

SUND OG BÆLT

PÅVIRKNING AF ØSTERSØEN FRA MARINE ANLÆGSPROJEKTER I BÆLTHAVET OG ØRESUND

EKSPERTNOTAT

ADRESSE COWI A/S
Parallelvej 2
2800 Kongens Lyngby

TLF +45 56 40 00 00

FAX +45 56 40 99 99

WWW cowi.dk

INDHOLD

1	Sammenfatning	3
2	Indledning	5
3	Østersøens hydrografi	6
3.1	Østersø-Nordsø systemet	6
3.2	Østersøen dybdeforhold	7
3.3	Saltholdighed og lagdeling	8
3.4	Vandudveksling	9
3.5	Andre processer med andre tidsskalaer	14
4	Strømningsmodstand fra større marine anlægsarbejder	20
4.1	Baggrund	20
4.2	Nulløsningsmetoden	21
4.3	Strømningsmodstand for de undersøgte infrastrukturprojekter	21
5	Påvirkning af Østersøen fra infrastrukturprojekter	25
5.1	Baggrund	25
5.2	Hydrografi	25
5.3	Vandkvalitet	26
5.4	Sammenfattet vurdering	27
6	Påvirkning af Østersøen fra klimaændringer	28
6.1	Baggrund	28
6.2	Klimabetingede ændringer	28

PROJEKTNR.

DOKUMENTNR.

A258774

A258774-HYD-TEK-01_Ekspertnotat

VERSION

UDGIVELSESDATO

BESKRIVELSE

UDARBEJDET

KONTROLLERET

GODKENDT

1.0

26 sept. 2024

Ekspertnotat

CRJ/FLJ/MBI

MBI/JJU/
THRY/BBC/ISH

JJU

6.3	Klimabetingede ændringer af hydrografien	30
6.4	Sammenfattende vurdering	34
7	Diskussion	36
8	Referenceliste	37

BILAG

Bilag A	Baggrundsviden
---------	----------------

1 Sammenfatning

Dette notat beskriver strømningsmodstanden i overgangsområdet mellem Nordsøen og Østersøen, dvs. Kattegat, Bælthavet nord for tærsklen mellem Gedser og Darss og Øresund nord for Drogden tærsklen. Strømningsmodstanden i dette område er af særlig interesse for Østersøens hydrografi, idet al vandudskiftning mellem indre Østersø og Nordsøen går gennem dette relativt smalle og lavvandede område. Modstandsforholdene af eksisterende infrastrukturprojekter og infrastrukturprojekter i undersøgelsesfasen (broer, tunneler og landvindinger) belyses på baggrund af eksisterende viden og foreliggende analyser med hensyn til deres effekt på strømningsforhold i overgangsområdet og på de hydrografiske forhold i den indre Østersø. Dermed menes først og fremmest ændringer i saltholdigheden i overflade og bundlag af den indre Østersø.

Notatet indeholder en grundlæggende beskrivelse af Østersøens hydrografi med særlig fokus på de mest betydende fysiske processer, der styrer Østersøens vandskifte. Processerne omfatter effekterne af ferskvandstilstrømning, saltvandsindstrømningsvariationer og interne blandingsprocesser. En beskrivelse af Østersøens historiske ændringer siden istiden illustrerer variabiliteten af Østersøens tilstande over forskellige tidsskalaer. Overordnet viser gennemgangen, at Østersøen i de seneste 2000 år har været et brakvandsområde, hvor afstrømning (50 års glidende middel) over de sidste 1000 år har varieret mellem 14.000 og 15.000 m³/s.

Strømningsmodstande fra de mest relevante infrastrukturprojekter beskrives og sammenlignes med hensyn til deres effekt på vandskiftet i den indre Østersø. Det viser sig, at projekterne med den største strømningsmodstand er Kattegat forbindelsen (er blevet undersøgt) og en fremskudt færgehavn ved Tårs (bliver aktuelt undersøgt).

I FEHY (2013) vurderes det, at effekter på hydrografi og vandkvalitet for den undersøgte broløsning i Femern Bælt ikke vil være betydende for miljøforholdene i den indre Østersø, og at den ikke vil medføre en konflikt med implementeringen af vandrammedirektivet (WFD) og havstrategidirektivet (MSFD). Da effekterne på hydrografien og vandkvaliteten fra de i herværende notat undersøgte faste forbindelser og projekter er af samme størrelsesorden som broløsningen, kan det antages, at effekterne fra disse faste forbindelser ikke vil medføre en væsentlig påvirkning af Østersøens hydrografi og vandmiljø eller være i konflikt ift. implementeringen af vandrammedirektivet (WFD) og havstrategidirektivet (MSFD).

De menneskabte klimaændringer og deres påvirkning af hydrografien og dermed af miljøforholdene i indre Østersø er medtaget for at perspektivere projekternes effekt. Ændringer forårsaget af projekterne sammenlignes med de ændringer, der forventes at ville ske under alle omstændigheder pga. klimaændringer. Der er især fokus på klimaændringer relateret til vandstandsstigning og ferskvandsafstrømning. Ændringerne på vindforholdene forventes at være begrænset men med en svag øgning (få procent). Ændringerne på vandtemperaturen spiller en vigtig rolle på vandmiljøet i Østersøen. Mulige effekter af vind og temperatur er ikke analyseret nærmere i det følgende.

Den mest direkte sammenligning mellem effekterne fra infrastrukturprojekter og klimaændringer er ændringen af strømningsmodstanden i overgangsområdet, fordi ændringerne forgår det samme sted (i overgangsområdet) og fordi de har den samme påvirkning (men er modsat rettet) af gennemstrømningen. Strømningsmodstanden fra infrastrukturprojekterne vil i overgangsområdet være én til to størrelsesordener mindre end den strømningsøgning, som klimaændringernes havspejlstigning vil medføre. Påvirkningen af infrastrukturprojekterne på gennemstrømningen er dermed ubetydelige og derudover modsat virkende klimaændringernes øgning af gennemstrømningen.

Projekternes effekt på Østersøens hydrografi og vandkvalitet er beskrevet og fundet til at være væsentlig mindre end de ændringer, der forventes på grund af klimaændringerne.

For saltholdighederne i Østersøens overflade og bund findes det, at effekterne fra de klimabetingede ændringer af vandstand og afstrømning på saltholdighederne begge har et bredt udfaldsinterval. De to processers virkning på saltholdighederne er af samme størrelsesorden, men virker modsat. Derfor vil den akkumulerede effekt på saltholdighederne være begrænset. Udfaldsintervallet for den akkumulerede klimaeffekt er en størrelsesorden større end udfaldsrummet for den projektbetingede effekt. Det bemærkes igen, at ændringerne, som projekterne vil have på saltholdighederne i den centrale Østersø, vurderes at være så små, at de vil være uden betydning.

2 Indledning

Dette notat skal på baggrund af eksisterende viden redegøre for langsigtet påvirkning af den indre Østersø fra introducerede strømningsmodstande i Kattegat, Bælthavet og Øresund, dvs. hovedsageligt fra infrastrukturprojekter. Vurderingen skal angive påvirkningernes omtrentlige størrelse og sammenholde dem med effekterne fra klimaændringer.

Store infrastrukturprojekter kan påvirke transporten af vand, salt og ilt m.m. gennem Kattegat, Bælthavet og Øresund, og dermed påvirke hydrografien og vandmiljøet i den indre Østersø. Det er omfanget af denne påvirkning, som skal vurderes.

Det bemærkes, at det er den introducerede kumulative modstand i Kattegat, Bælthavet og Øresund, som skal vurderes. Følgende større infrastrukturprojekter i overgangsområdet og de projekter, der er blevet eller aktuelt bliver undersøgt, men for hvilke der ikke er truffet beslutning om gennemførelse, indgår i undersøgelsen: Den fremskudte færgehavn ved Tårs, Østlig Ringvej, Kattegatforbindelsen, en fast forbindelse mellem Als og Fyn samt fra en stormflodssikring af København. Disse projekter kaldes her "infrastrukturprojekter".

Redegørelsen bygger på overordnede officielle publikationer fra f.eks. HELCOM og BACC II samt på publikationer om påvirkninger af Østersøen fra faste forbindelser (FEHY, 2013). Derudover indgår et stort antal publikationer, der er offentliggjort i den videnskabelige litteratur omkring udviklingen af forskellige aspekter af Østersøens hydrografiske tilstand. Publikationerne omfatter både naturlige ændringer og påvirkninger, der er menneskeskabte, samt effekter fra klimaændringer, der er indirekte menneskeskabte påvirkninger.

Notatet er opdelt, som følger:

Afsnit 3: Østersøens hydrografi beskrives, herunder dybdeforhold, vandudveksling, saltholdighedsfordeling og lagdeling, opholdstid og udvikling siden sidste istids ophør.

Afsnit 4: Strømningsmodstand fra infrastrukturer og andre faste strukturer i Kattegat, Bælthavet og Øresund beskrives. Nulløsningskonceptet beskrives mht. dets formål, forudsætninger og dets beregningsmetode. Derudover nævnes eksempler på tal for strømningsreduktion inklusiv deres forudsætninger.

Afsnit 5: Strømningsmodstandens effekt på hydrografien og vandmiljøet i Østersøen.

Afsnit 6: Effekt af klimaændringer, og effekternes størrelsesorden sammenstilles og diskuteres under hensyntagen til forudsætninger og usikkerheder.

3 Østersøens hydrografi

3.1 Østersø-Nordsø systemet

Østersøen, Nordsøen og dele af Atlanterhavet er vist i Figur 3-1. Udvekslingen af vand og salt mellem Østersøen og Nordsøen er af væsentlig betydning for forholdene i Østersøen, mens Nordsøen er kraftigt påvirket af Atlanterhavet.

Grænsen mellem Nordsøen og Østersøen er den samme som grænsen mellem Kattegat og Skagerrak. Grænser er vist med rød linje i Figur 3-1.



Figur 3-1 Satellit foto der viser Østersøen, Nordsøen og Atlanterhavet.
Orange linje: Grænse mellem Atlanterhavet og Nordsøen
Rød linje: Grænsen mellem Nordsø og Østersø
Gule linjer: Undersøiske tærskler ved Gedser ("Gedser-Darss-tærsklen") og Kastrup-Malmø ("Drogden-tærsklen").

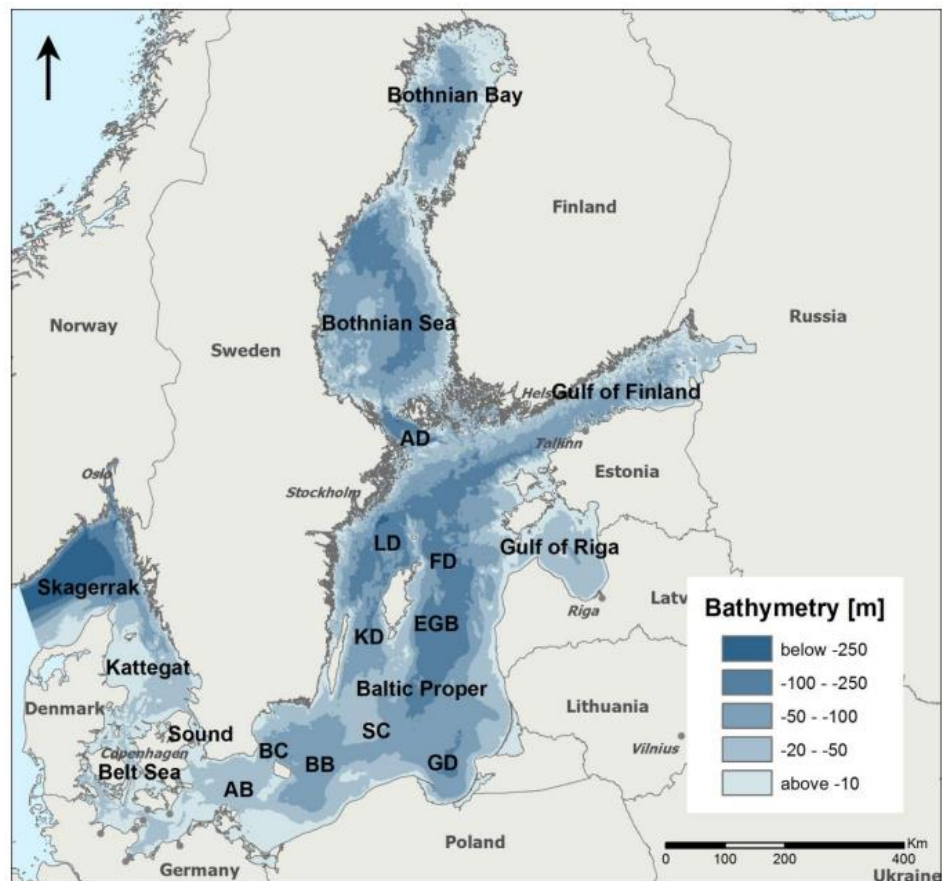
Østersøen opdeles normalt i to dele, en indre Østersø og et Østersø overgangs-område:

- Indre Østersø er området øst for de lavvandede tærskler Gedser-Darss og Drogden, som er indikeret med to gule linjer i Figur 3-1. Salt og dermed tungere vand fra Nordsøen, der passerer over tærsklerne, vil på grund af dets højere massefylde dykke og strømme nedad mod de dybe bassiner i den Indre Østersø, hvor saltvandet "fanges" og tilbageholdes af tærsklerne. Saltet kan kun forlade Østersøen igen efter at være blandet og fortyndet i Østersøens øvre vandlag.

- Østersøens overgangsområde betegner området mellem Nordsø – Østersø grænsen (mellem Skagen og Gøteborg) og til Gedser-Darss og Drogden tærsklerne. Dette område er meget smalt og i store dele lavvandet (i forhold til indre Østersø og Nordsøen) og virker derfor begrænsende på vandudvekslingen mellem indre Østersø og Nordsøen. Overgangsområdets betydning for vandudvekslingen udtrykkes som strømmodstand og beregnes med forskellige metoder. Etablering af infrastrukturprojekter (f.eks. broer, eller dæmninger) i dette overgangsområde kan bidrage til en øget strømningsmodstand og dermed potentielt påvirke hydrografien og vandmiljøet i Østersøen. Etablering af tilsvarende infrastrukturprojekter i Nordsøen eller i indre Østersø vil ikke påvirke vandudvekslingen i sammenlignelig eller nævneværdig grad, da modstanden der er meget mindre end i overgangsområdet.

3.2 Østersøen dybdeforhold

Østersøens dybdeforhold er vist i Figur 3-2.



Figur 3-2 Kort over dybderne i Østersøen. Forkortelser viser bassiner og tærskler: Arkona Bassinet (AB), Bornholmer Strædet (BC), Bornholm Bassinet (BB), Stolpe Kanalen (SC), Gdansk Dybet (GD), Østlig Gotland Bassinet (EGB), Landsort Dybet (LD), Fårö Dybet (FD), Karlsö Dybet (KD) og Åland Dybet (AD) (FEHY, 2013).

Figuren illustrerer, hvordan den indre Østersø er opdelt i dybe bassiner, der er adskilt af tærskler:

- Bassinerne af særlig interesse i dette notat er fra vest mod øst: Arkona-, Bornholmer- og Østlig Gotland Bassinerne
- De tilsvarende tærskler af særlig interesse er: Gedser-Darss og Drogden tærsklerne, samt Stolpe Kanalen.

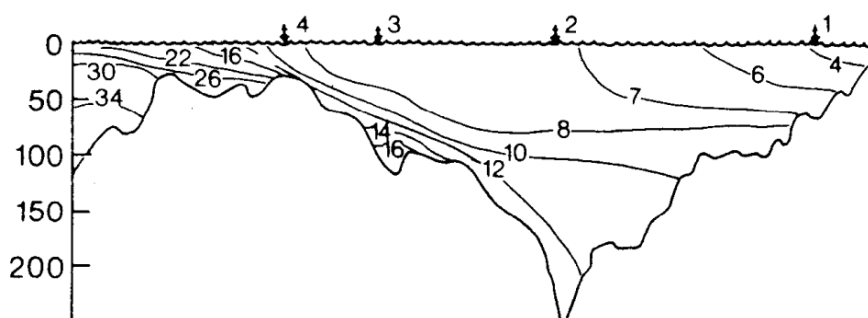
Tærsklerne Gedser-Darss og Drogden har de mindste vanddybder mellem Nordsø og indre Østersø. Darss tærsklen er omtrent 15 m dyb og Drogden tærsklen omtrent 7 m dyb.

Tærsklerne spiller en vigtig rolle for Østersøens vandskifte fordi de begrænser indstrømning af salt, dvs. tungt Nordsøvand til indre Østersø, da denne forløber som en kaskadeprocess fra bassin til bassin. Det nedre lag i bassinerne spiller en vigtig rolle fordi de indeholder relativ stillestående vandmasser, der typisk er udsat for iltvind.

3.3 Saltholdighed og lagdeling

Østersøen kan betragtes som en stor tærskelfjord, dvs. et vandområde der er omgivet af land, har en åbning mod havet/oceanet og er påvirket af ferskvand. En blanding af ferskvand og oceanvand kaldes brakvand. Biologien i et sådant brakvandsområde er tilpasset de specielle saltholdighedsforhold. Et særkende er lagdelingen, hvor ferskere og dermed lettere vand indlejrer sig over tungere saltholdigt vand. Skillefladen mellem lagene repræsenterer en barriere for transport af vand og dermed af opløste stoffer som f.eks. ilt på tværs af skillefladen.

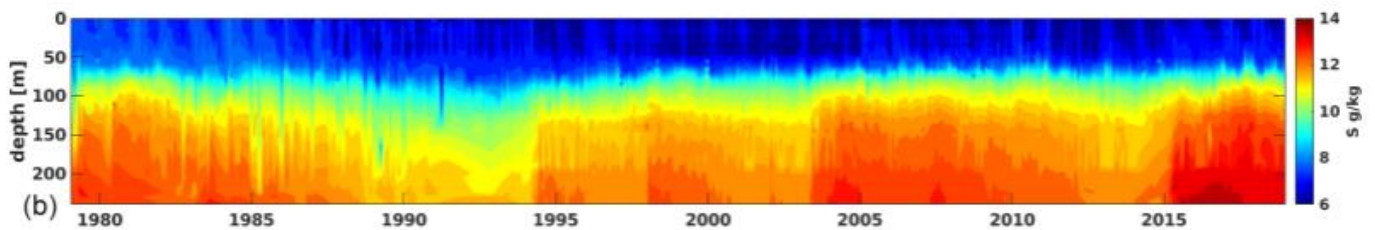
En typisk vertikal og horisontal fordeling af saltholdigheden i Østersøen langs den dybeste linje (Thalweg) ind i Østersøen er vist i Figur 3-3.



Figur 3-3 Skematisk saltholdighedsfordeling langs den longitudinale akse gennem Østersøen fra Skagerrak til den Finske Bugt. Saltholdigheden er lavere ved overfladen på grund af ferskvandstilførslen til Østersøen og højere ved bunden på grund af indstrømningen af saltvand fra Nordsøen (fra Mälkki og Tamsaly, 1985).

Østersøens overordnede hydrografi beskrives i det følgende, dvs. Østersøens udstrækning, dybdeforhold, og dens vandudvekslings- og saltholdighedsforhold. Beskrivelsen fokuserer på de aspekter af Østersøens hydrografi, der er påvirket af overgangsområdets strømningsmodstand og dermed vandudvekslingen gennem Kattegat, Bælthavet og Øresund.

I Østersøen er vandets densitet først og fremmest styret af vandets saltholdighed (temperaturen spiller en mindre rolle). Saltholdighedsfordelingen og dermed lagdelingens variation over tid og dybde i den centrale del af Østersøen er illustreret i Figur 3-4.



Figur 3-4 Målt saltholdighedsfordeling i østlig Gotland Bassin i periode 1979-2018 (Lehmann et al., 2022). (Data i perioden 1989-1994 muligvis misvisende).

Figuren illustrerer saltholdigheden (angivet i g salt/kg havvand, som her kan regnes for det samme som ‰ eller ‐psu‐) i østlig Gotlands Bassin i en dybde på ca. 245 m. Tidsserien strækker sig fra 1979 til 2018. Tidsserien viser den generelle lagdeling med et øvre (blå) næsten homogent lag på 60 m tykkelse og med en saltholdighed på mellem 6 og 8 ‰. Saltholdigheden stiger mod bunden, hvor den varierer mellem ca. 11 og 14 ‰. Derudover observeres, at der foregår pludselige stigninger i saltholdigheden under ca. 100 m dybde, som indikerer større saltvandsindstrømninger over tærsklerne. Langsomt voksende afstande mellem de røde og gule farvenuancer (dvs. aftagende spring i saltholdighed) indikerer blanding, på grund af turbulens mellem lagene.

3.4 Vandudveksling

Belysning af Østersøens vandudveksling og hvordan den påvirkes af modstandsforholdene i overgangsområdet, er af central betydning for nærværende notat. Følgende forhold er væsentlige for vandudvekslingen mellem Nordsøen og Østersøen og de interne cirkulationer i Østersøen:

- > Dybdeforhold (beskrevet i afsnit 3.2)
- > Oceanografiske forhold i Nordsøen
- > Ferskvandtilstrømning inkl. nettonedbør
- > Vind og lufttryk

Fokus er på disse vigtige processer, der er beskrevet yderligere i det følgende.

3.4.1 Oceanografiske forhold i Nordsøen

Den gennemsnitlige saltholdighed i Nordsøen er 35 ‰ og tæt på saltholdigheden i Atlanterhavet på grund af Nordsøens brede åbning mod Atlanterhavet. På grund af den høje saltholdighed er vandmasserne i Nordsøen lidt tungere end vandet i Østersøen, der har en mindre saltholdighed på grund af ferskvandsafstrømningen til Østersøen, se også Figur 3-3. I det sydøstlige Skagerrak / nordlige Kattegat dykker Nordsøens vandmasser ned ved den nordlige Kattegatfront, se f.eks. (Jakobsen, 1997), og strømmer ind under det lettere overfladevand i Østersøens overgangsområde og videre ind mod dybdebegrænsningerne ved

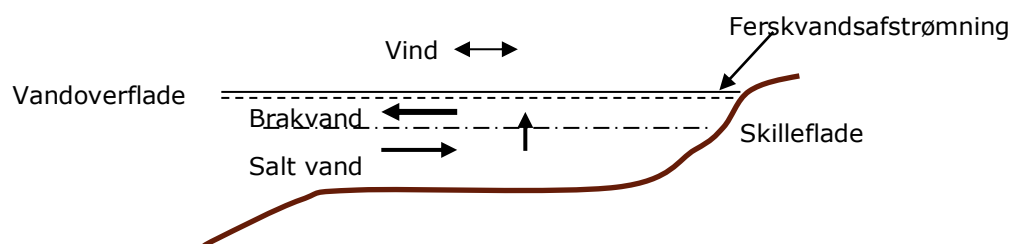
Gedser-Darss og Drogden tærsklerne. I forbindelse med vinddrevne indstrømningshændelser fra Nordsøen og ind i indre Østersø, kan det tunge Nordsøvand presses over de to tærskler og fortsætte ind i den indre Østersø. Mindre indstrømningshændelser er også observeret under rolige vindforhold.

Tidevandsbølger genereres i oceanerne, og fra Atlanterhavet forplanter de sig ind i Nordsøen og bevæger sig mod uret rundt i Nordsøen, mens tidevandsbølgen aftager pga. bundfriktion. Ved Skagerrak drejes en del af tidevandsbølgen ind i Skagerrak og videre ind i Kattegat, hvor tidevandsamplituden aftager yderligere til omtrent 20 cm i det sydlige Kattegat. Tidevandsbølgen fortsætter igennem Bælthavet og Øresund og ind i den indre Østersø, hvor tidevandsamplituden aftager yderligere og er meget svag. Den tidevandsgenererede vandudveksling i Bælthavet og Øresund er derfor begrænset. Tidevandstrømningerne i Bælthavet og Øresund giver dog et væsentlig bidrag til blanding mellem øvre og nedre lag i overgangsområdet.

Tidevandet i Kattegat kan overordnet karakteriseres ved en periode på ca. 12,4 timer og med en amplitude på ca. 0,2 m. Indre Østersø har ikke nævneværdigt tidevand, vandstandsændringerne præs af vindbetingede svingninger (seiching). Den typiske periode for vindbetingede svingninger i Østersøen er ca. 1 døgn (Wübbler & Kraus, 1979).

3.4.2 Ferskvandstilstrømning

Generelt betyder ferskvandstilstrømning til en fjord, at der til stadighed tilføres en vandmasse, der er lettere end det vand der i forvejen er i fjorden. Dette betyder, at det ferske og lettere ferskvand vil lægge sig i overfladen. Vindens friktion på havoverfladen fører til, at det ferske vand blandes med det underliggende mere salte vand og danner et øvre lag, der består af en blanding af ferskvand og havvand, også kaldet brakvand. Vandmasserne blandes forholdsvis ensartet på langs og på tværs af fjorden, sådan at der over dybden dannes en skilleflade, se skitse i Figur 3-5.



Figur 3-5 Principskitse for vandskifte på grund af ferskvandstilstrømning.

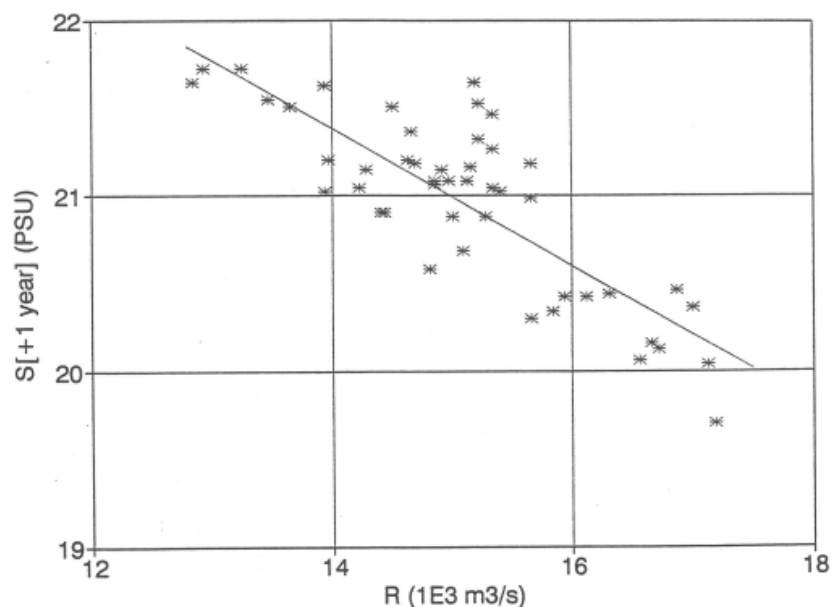
I det dybe vand i fjorden er der en indadgående strømning pga. blandingen med overfladelaget. Denne form for vertikal cirkulation i en fjord kaldes også for den "estuarine cirkulation". Den foregår så længe der tilføres ferskvand og repræsenterer en af de vigtigste vandskifteprocesser i fjordområdet.

Den gennemsnitlige afstrømning til Østersøen er omtrent 15.000 m³/s (HELCOM 2016), svarende til 473 km³/året, nettonedbøren svarer til omkring 5-10% af afstrømningen, se Tabel 3-1.

Måned	ΔV (km ³)	L (km ³)	P (km ³)	E (km ³)	H-M (km ³)
januar	-21,90	27,63	20,35	18,40	51,48
februar	-28,06	25,78	16,20	11,05	58,99
marts	-29,07	32,76	12,87	9,20	65,50
april	4,86	49,58	15,36	4,12	55,96
maj	2,33	67,11	17,03	4,25	77,56
juni	20,60	55,79	17,44	8,54	44,09
juli	47,77	40,70	25,75	16,45	2,23
august	-5,82	37,86	29,90	22,26	51,32
september	9,98	35,07	26,16	33,23	18,02
oktober	0,96	35,45	24,09	27,84	30,74
november	-11,72	34,40	25,75	24,68	47,19
december	15,77	30,74	23,67	26,79	11,85
I alt	4,74	472,94	254,57	206,83	515,94

Tabel 3-1 Ændring i volumen (ΔV), afstrømning (L), nedbør (P), fordampning (E) og nettoudstrømning (H-M) for årene 1951 til 1970 (fordampning er fra 1948 til 1970). I vurderingen af ændringen af volumen ΔV er der ikke taget hensyn til bælteerne og Kattegat. Nettoudstrømning er beregnet fra vandbalance ligningen: $H-M = -\Delta V + L + P - E$. (HELCOM, 1986).

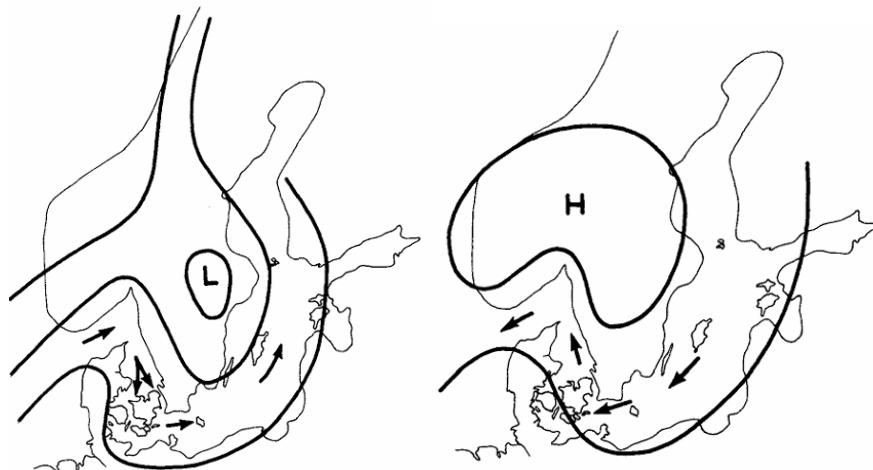
Sammenhængen mellem saltholdigheden ved Anholt og ferskvandsafstrømningen til Østersøen er vist i Figur 3-6. Det ses som forventet, at saltholdigheden ved Anholt er højst ved mindre afstrømning og lavest ved større afstrømning (saltholdigheden er her angivet i PSU "Practical Salinity Unit", som omtrent svarer til ‰).



Figur 3-6 Sammenhæng mellem fem års glidende middelværdi af saltholdigheden (S) i overfladen ved Anholt (y-akse) og fem års glidende middelværdi af flodernes afstrømning (R) til Østersøen, hvor saltholdigheden er sammenlignet med afstrømningen et år tidligere. Baseret på afstrømningsdata fra (HELCOM, 1986) og saltholdighedsdata fra (Svansson, 1975), (Jakobsen et al., 1996).

3.4.3 Vind og lufttryk

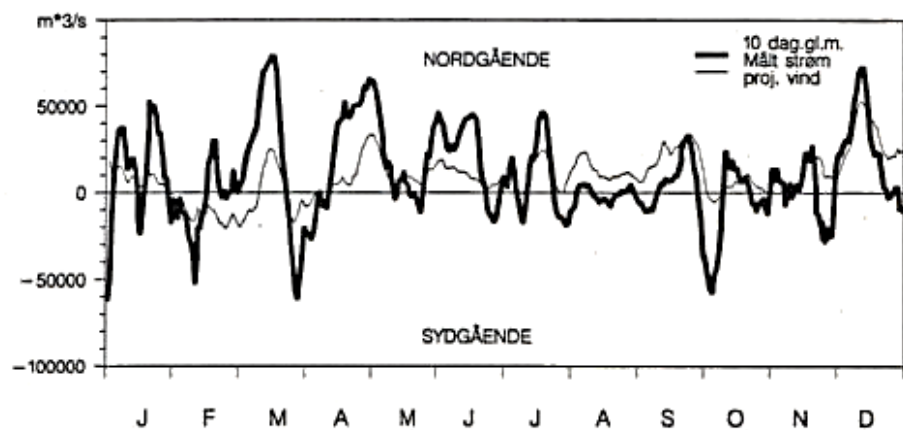
De aktuelle gennemstrømninger i overgangsområdet mellem Skagen og Gedser drives af de atmosfæriske forhold, især vindforholdene. Vindforholdene afhænger af højtryk og lavtryksfelter, der passerer over Skandinavien. Nedenstående figur illustrer, hvordan lavtryk over Skandinavien giver sydvestlige vinde og indstrømning til Østersøen, mens højtryk giver østlige vinde og udstrømning.



Figur 3-7 Venstre: Indstrømning fra Nordsøen mod Østersøen ved vindretninger omkring sydvest med et lavtryk (L) på vej fra Nordsøen over Skandinavien. Højre: Udstrømning fra Østersøen i forbindelse med højtryk (H). Efter (Miljøstyrelsen, 1976).

Vind fra sydvestlige retninger over Nordsøen giver anledning til en vindstuvning, dvs. forhøjet vandstand, i Kattegat ("Nordsøen blæses mod Göteborg"). Over Østersøen giver sydvestlige vinde anledning til vindstuvning ved Finland og tilsvarende lave vandstande i den vestlige Østersø ("Østersøen blæses mod Finland"). En høj vandstand mod nord i overgangsområdet og en lav vandstand mod syd giver sydgående strøm i bælterne og Øresund ved sydvestlig vinde. Tilsvarende gælder for østlige vinde, som skaber en modsat vandstandsgradient med høj vandstand i den vestlige Østersø og lavere vandstand i Kattegat, der giver nordgående strøm i bælterne og Øresund. Perioder med fortrinsvis sydvestlige vinde giver dermed længerevarende indstrømninger til Østersøen, mens perioder med østlige vinde er præget af udstrømning fra Østersøen.

En illustration af denne kvalitative sammenhæng for Storebælt er vist i Figur 3-8, der indikerer, at der kan observeres en form for kvalitativ sammenhæng mellem målinger af vind og målinger af strøm. At der ikke opnås fuldstændig overensstemmelse mellem de to kurver viser, at strømmen i Storebælt er bestemt af flere parametre end kun vind, herunder f.eks. lufttryk og svingninger i Østersøen.



Figur 3-8 Aktuelle vandføringer beregnet over hastighedsmålinger i Storebælt i 1995 sammenholdt med målte vindhastigheden projiceret på 45 grader. (Fyns Amt, 1996).

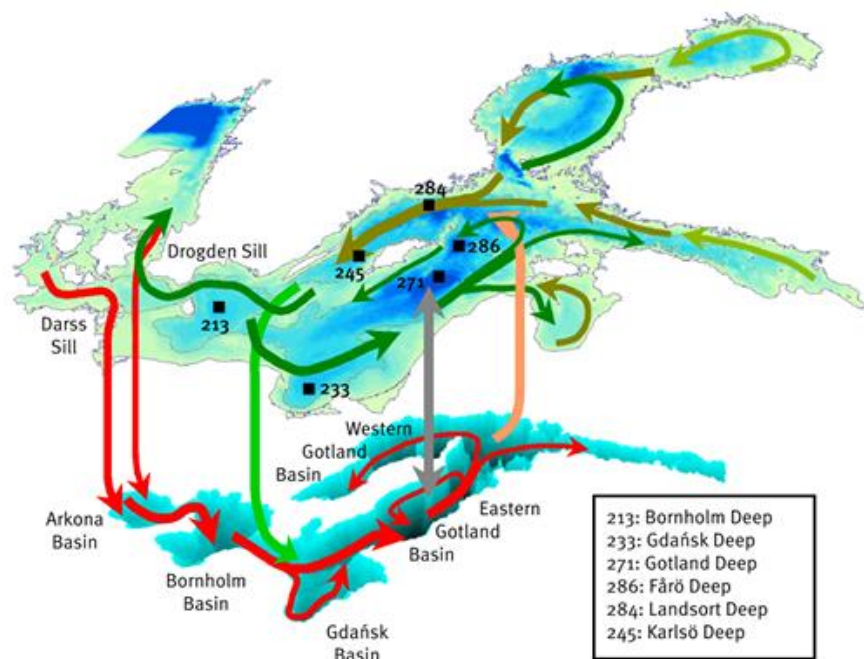
De vindgenererede strømningsforløb har typisk karakter af en pulserende strømning, der skifter mellem ind- og udstrømning med en typisk periode på ca. 1 måned, se Figur 3-8. Dette har to vigtige virkninger på Østersøens vandskifte:

1. De høje strømhastigheder i overgangsområdet giver anledning til turbulens og dermed til blanding mellem øvre og nedre lag. Saltholdigheden i øvre lag stiger dermed, hvilket øger salttransporten over tærsklerne ved indadgående strømning
2. Tærsklerne virker desuden som ensretterventiler for saltvand, idet det salte og tungere vand fra Kattegat under indstrømning vil strømme over tærsklerne for derefter på grund af dets høje tyngde at dykke og strømme nedad mod de dybe bassiner. Ved en efterfølgende udstrømningshændelse kan denne vandmasse ikke strømme tilbage, fordi det nu ligger dybere og under tærsklerne. Under udstrømning vil kun lettere vand fra Østersøens øverste lag strømme over tærsklerne. Saltvandet er således "fanget" i Østersøens nedre lag, og kan kun forlade Østersøen efter blanding med overfladelaget og udadgående transport.

På denne måde opretholdes saltbalancen for Østersøen, der observeres dog langperiodiske variation (over dekader), se f.eks. Figur 3-4 og Figur 3-6.

3.4.4 Samlet vandskifte i Østersøen

Østersøen samlede vandskifte består i hovedtræk af en samlet virkning af de ovenfor beskrevne processer. Den resulterende langtidscirkulation også kaldet storskala cirkulation er illustreret i nedenstående Figur 3-9.



Figur 3-9 Skematisk storskala cirkulation i Østersøen.
Røde pile: Indstrømning af saltvand og dets cirkulation i nedre lag
Grønne pile: Udstrømning af brakvand og dets cirkulation i øvre lag
Tallene angiver IOW overvågningsstationer. (IOW, 2016).

Figur 3-9 viser, at strømningssystemet styres udefra (de røde og grønne pile) ved mødet mellem og blandingen af det indstrømmende saltvand og ferskvandet fra Østersøens opland. Strømningssystemet skaber en karakteristisk cirkulationen i den indre Østersø, som er illustreret ved:

- > grå pil indikerer blanding mellem øvre og nedre vandmasser
- > lysebrun pil indikerer den resulterende opadrettet medrivning
- > lysegrøn pil indikerer nedadrettet medrivning under indstrømmende tungt saltvand.
- > Pilene i Finske Bugt og Botniske Bugt repræsenterer ferskvandstilstrømning

Da hydrografen i Østersøområdet således i høj grad styres af indstrømningen af hhv. saltvand og ferskvand samt udstrømningen af brakvand, har strømningssforholdene og dermed modstandsforholdene i overgangsområdet en væsentlig betydning. Dette understreger vigtigheden af, at de styrende hydrografiske processer i Østersøen beskrives og modelleres fysisk korrekt for at kunne vurdere følgevirkningerne i Østersøen af infrastrukturprojekter ved indgangen til Østersøen i overgangsområdet.

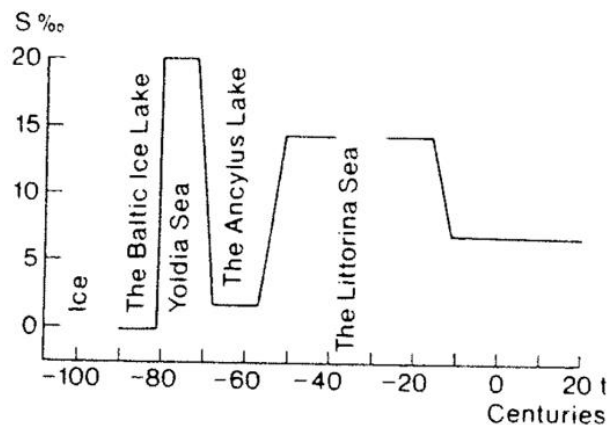
3.5 Andre processer med andre tidsskalaer

Ovenstående afsnit beskriver processer med tidsskalaer på halve døgn (tidevand), måneder (vind-perioder) eller år (afstrømning). Dette afsnit beskriver variabilitet af Østersøens tilstande over længere tidsskalaer uden at gå nærmere ind i de bagved liggende styrende processer over de sidste 10.000 år.

3.5.1 Over de sidste 10.000 år

Siden istiden har Østersøen gennemgået flere store hydrografiske ændringer på grund af landhævning og -sænkning samt på grund af ændringer af havspejlet.

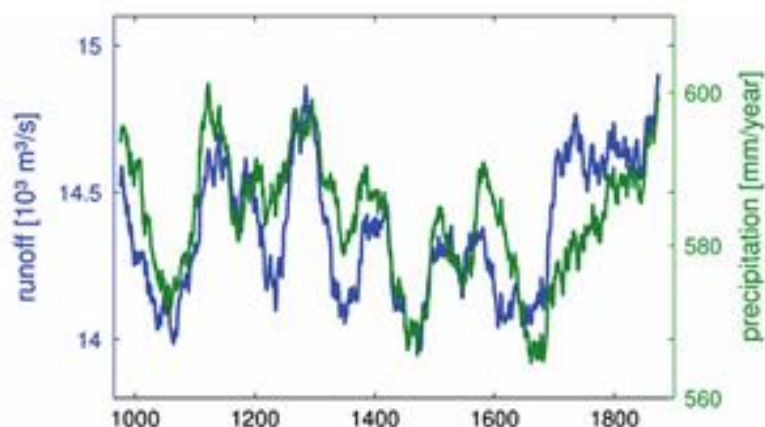
Dette og andre processer (bl.a. styret af atmosfærisk og oceanisk variabilitet) har givet anledning til betydelige ændringer i saltholdigheden gennem de sidste ca. 10.000 år, se Figur 3-10.



Figur 3-10 Vurderet tidlig udvikling af saltholdigheden i Østersøen gennem de sidste 11.000 år, efter (Kessel og Punning, 1972).

3.5.2 Over de sidste 1.000 år

Ferskvandsafstrømning til Østersøen har en betydende indflydelse på saltholdigheden i Østersøen. Den modellerede ferskvandsafstrømning over de sidste ca. 1.000 år er vist i Figur 3-11 (BACC II, 2015), og illustrerer at afstrømningen sandsynligvis har varieret mellem 14.000 og 15.000 m³/s (50 års glidende midde).



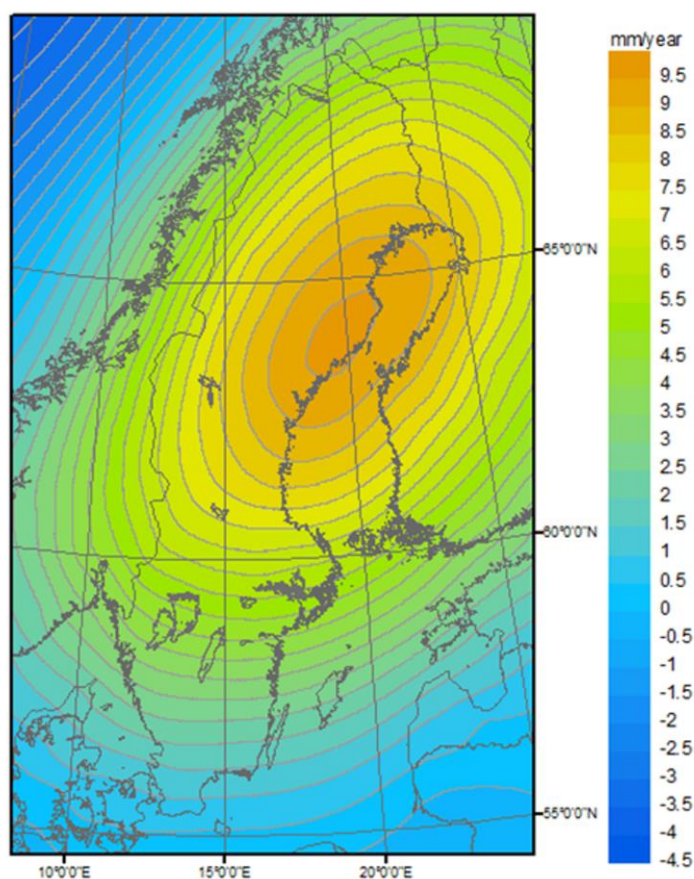
Figur 3-11 Årsnedbør over Østersøens opland (grøn) og statistisk estimeret afstrømning (blå) som 50 års glidende middel (BACC II, 2015).

3.5.3 Over de sidste 100 år

En række trends beskrevet nedenfor er observeret over de sidste 100 år. Bemærk, at de øjeblikkelige og de i fremtiden forventede ændringer kan afvige væsentligt på grund af de tiltagende klimaændringer.

Landhævning

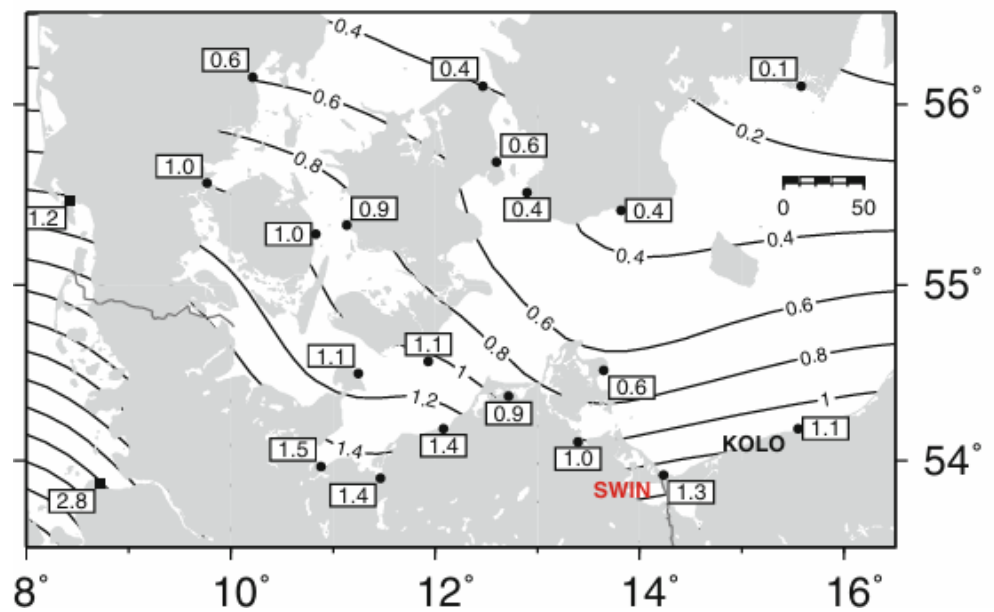
Bestemmelser af landhævning, som den er i disse år, er givet i Figur 3-12.



Figur 3-12 Årlig landhævning ifølge NKG2016LU modellen (SMHI, 2024).

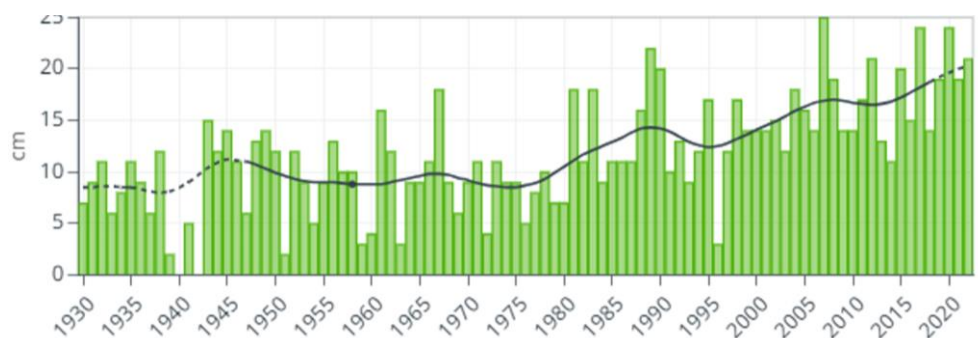
Vandstand

Vandstandsændringer er af særlig vigtighed i overgangsområdet. Vandstandsændring over de sidste 100 år (angiveligt mellem 1900 og 2000) er vist i nedenstående Figur 3-13. Figuren illustrerer, at en vandstandsændring på ca. 1 mm/år er gældende for Storebælt og Femern Belt, som kan anses for typisk for overgangsområdet.



Figur 3-13 De sidste 100 års relativ vandstandsændring (mm/år) bestemt ved vandstandsmålinger i den sydlige Østersø (BACC II, 2015).

Nyeste målinger fra (SMHI, 2023) indikerer en vandstandsstigning på ca. 10 cm mellem år 1980 og år 2022, dvs. 2,2 mm per år, se Figur 3-14. Der ses en tiltagende effekt af havspejlsstigningen (fra 1980 og frem).



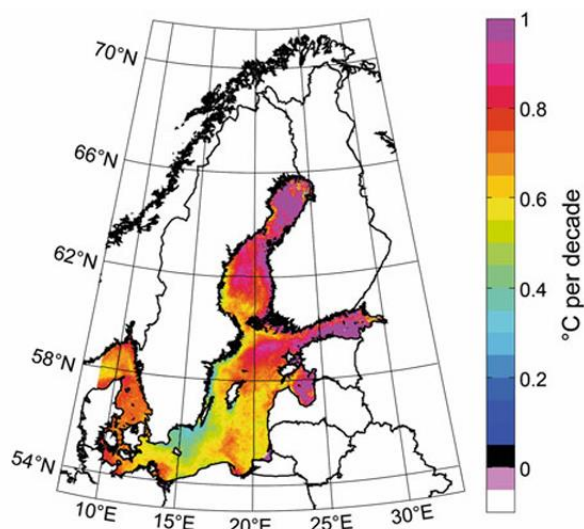
Figur 3-14 Årsmiddelværdi for vandstand ved Klagshamn (overgangsområdet) justeret for landhævning (SMHI, 2023).

Afstrømning

Ingen statistisk signifikant trend for afstrømning for Østersøen som helhed kunne konstateres i (BACC II, 2015).

Temperatur

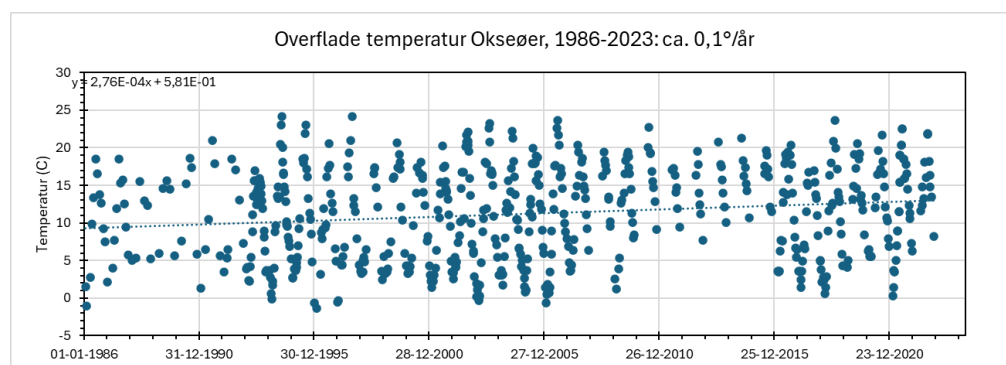
Ændringen af vandtemperaturen i Østersøen udviser store regionale forskelle, se Figur 3-15.



Figur 3-15 Lineær trend af årsmiddel havtemperatur i overfladen, baseret på satellit målinger (1990-2008) af den Føderale Maritime og Hydrografiske Myndighed (BSH), fra (BACC II, 2015).

Det ses, at havtemperaturen er steget i hele Østersøen, mest udpræget imod nord og øst ($1^{\circ}\text{C}/10$ år), men også i overgangsområdet ($0,7^{\circ}\text{C}/10$ år).

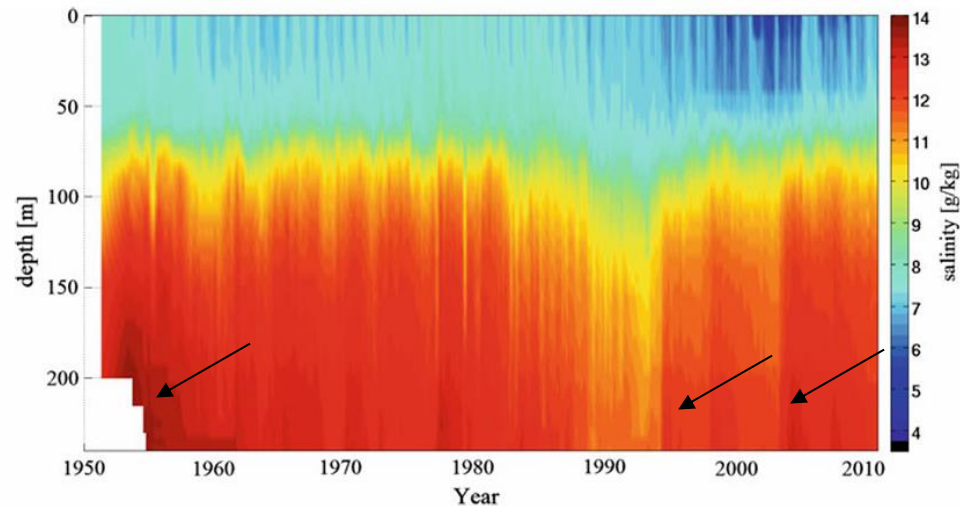
Ovenstående satellitmålinger bekræftes af temperaturmålinger fra det danske havmiljøovervågningsprogram. Således viser Flensborg Fjords overfladevand en stigning i temperaturen over perioden 1986-2023 på $1,0^{\circ}\text{C}/10$ år svarende til en temperaturforskel på $3,7^{\circ}\text{C}$ siden 1986, se Figur 3-16. Data fra (DCE, 2024).



Figur 3-16 Temperaturmålinger i overfladen i Flensborg inder Fjord ved Okseøerne (station 95710002), i perioden 1986-2023. (DCE, 2024).

Saltholdighed og lagdeling

Saltholdighed og lagdeling i den indre Østersø (Gotland bassinet) for år 1952-2010 er vist i Figur 3-17.



Figur 3-17 Målt saltholdighed i Gotland Dybet som funktion af vanddybde (y-akse) og tid (x-akse). Pilene indikerer eksempler på nogle af de mest markante saltvandsindstrømning. Fra (BACC II, 2015). (Der er forbehold overfor data i perioden 1989-1994, se også Figur 3-4).

For overfladen observeres en årscyklus på grund af afstrømningens variationen over året. Figuren illustrerer ligeledes en tendens til øget ferskvandafstrømning mod slutning af perioden (1995-2010). Udvalgte hændelser af større saltvandsindstrømninger er indikeret med pile (kun tre hændelser er indikeret af hensyn til overskueligheden).

Overordnet viser gennemgangen, at Østersøen i de seneste 2000 år har været et brakvandsområde, hvor afstrømning (50 års glidende middel) over de sidste 1000 år har varieret mellem 14.000 og 15.000 m³/s.

De fremtidige aspekter af de forskellige ændringer på Østersøens hydrografiske forhold er belyst i afsnit 6.

4 Strømningsmodstand fra større marine anlægsarbejder

4.1 Baggrund

Der er i de sidste omtrent 100 år bygget flere markante bro- og tunnelforbindelser i Østersøens overgangsområde. Det vil sige i området med stor modstand for vandudvekslingen mellem Nordsøen og indre Østersø, og hvor forbindelserne derfor kan påvirke vandudvekslingen.

De eksisterende og påbegyndte forbindelser er:

- Gamle Lillebæltsbro, åbnet 1935
- Nye Lillebæltsbro, åbnet 1970
- Storebæltsforbindelsen, åbnet 1997-1998
- Øresundsforbindelsen, åbnet 2000
- Femern Bælt forbindelsen, som er under opførelse og forventes at åbne i 2029

De to Lillebæltsbroer blev bygget uden at betragte deres modstand for gennemstrømningen. Det var ikke et emne på det tidspunkt. Deres samlede strømningsreduktion er senere estimeret til 0,7% i Lillebælt (Jakobsen & Møller, 1996), hvilket svarer til en reduktion på 0,06% i overgangsområdet og er således begrænset (forklaring på reduktion kan findes i afsnit 4.3).

De første ideer om en Storebæltsforbindelse går tilbage til 1855 og undervejs var der udkast, der indeholdte lange jorddæmninger og en stor reduktion af gennemstrømningen i Storebælt. Derfor vakte det også hydrografisk interesse og bekymring. I forbindelse med planlægningen af den nuværende Storebæltsforbindelse blev der fokuseret på at få en forbindelse med begrænset reduktion og at udføre kompensationsafgravninger for at fjerne den resterende reducerende effekt. Uden kompensationsafgravning ville Storebæltsforbindelsens strømningsreduktion være omkring 0,70% (0,46-0,93%, baseret på forbindelsens modstand i Jakobsen et al., 1996 og Storebælts modstand i Jakobsen et al., 2010). Ved kompensationsafgravning er det opnået, at Storebæltsforbindelsen ikke har nogen reducerende effekt for gennemstrømningen i Storebælt. Forbindelsen påvirker derved ikke den indre Østersø.

Ved planlægningen af Øresundforbindelsen blev disse principper fastholdt. Det første layout for Øresundsforbindelsen havde en strømningsreduktion på 2,3%, som ved optimering af layout blev mindsket til 0,5%. Denne reduktion blev derefter fjernet ved hjælp af kompensationsafgravninger. Øresundsforbindelsen har ikke nogen reducerende effekt for gennemstrømningen i Øresund og som Storebæltsforbindelsen påvirker den derved ikke den indre Østersø.

Femern Bælt forbindelsen er en tunnel og har derfor ingen strømningsreduktion (Femern, 2012). Femern Bælt forbindelsen påvirker således ikke indre Østersø.

4.2 Nulløsningsmetoden

Det overordnede miljøkrav til Storebælts- og Øresundsforbindelserne mht. til indre Østersø var, at forbindelserne ikke måtte påvirke vandmiljøet i indre Østersø. Dette blev i lovgivningen operationaliseret og skærpet til, at forbindelserne ikke måtte give anledning til en ændring af vandgennemstrømningen og salttransporten i henholdsvis Storebælt og Øresund.

Da Storebælts- og Øresundsforbindelserne blev designet, var det ikke muligt at kvantificere forbindelsernes påvirkning på indre Østersø, hvis de reducerede gennemstrømningen, da de tilgængelige værktøjer (numeriske modeller) var begrænsede ift. dagens værktøjer. Modellerne for Storebælts- og Øresundsforbindelserne dækkede således kun begrænsede geografiske områder og modellerede alene transporten af vand og salt gennem stræderne.

For at opfylde det overordnede miljøkrav om ikke at påvirke den indre Østersø, blev "nulløsnings" konceptet/metoden udviklet og benyttet, se for eksempel (Møller & Ottesen Hansen, 1988), (Farmer & Møller, 1990) og (Ottesen Hansen & Møller, 1990). Ideen bag nulløsningen er, at hvis forbindelserne ikke ændrer gennemstrømningsforholdene lokalt i Bælthavet og Øresund, da vil de ikke ændre forholdene i den indre Østersø.

At forholdene ikke blev ændret lokalt, blev opnået ved at sikre, at transporten af vand og salt gennem hhv. Storebælt og Øresund ikke blev ændret (nul ændring = matematisk nulløsning). Modstanden fra forbindelserne, som kunne reducere transporterne, blev kompenseret ved lokale afgravninger, der opvejede modstanden fra forbindelsen. For at mindske usikkerhederne i beregningerne blev kompensationsafgravningerne udført tæt på forbindelserne (det bemærkes, at den største effekt af kompensationsafgravning fås ved at grave, hvor der er mest modstand, dvs. generelt på tærsklerne, hvor strømhastighederne er størst).

Det bemærkes, at kompensationsafgravning har tidsbegrænset lokal påvirkning på vandmiljøet nær afgravningerne, se for eksempel (Østlig Ringvej, 2023). Spild fra afgravningerne giver sedimentfaner, der for eksempel kan skygge for ålegræs. Kompensationsafgravninger kan således påvirke lokal natur. Krav til afgravninger bliver formuleret i forbindelse med bygning af forbindelserne og monitoreret for at mindske afgravningernes negative effekt. Men det bemærkes, at kompensationens afgravninger også har en økonomisk omkostning.

4.3 Strømningsmodstand for de undersøgte infrastrukturprojekter

De undersøgte infrastrukturprojekter, der er inkluderet i denne ekspertvurdering er:

- Stormflodssikring af hovedstaden (SH), hvor det væsentligste bidrag er fra Lynetteholm, som er miljøvurderet og vedtaget ved anlægslov. Perimeteren for Lynetteholm planlægges færdig i 2026
- Østlig Ringvej, som er under miljøvurdering
- Als-Fyn forbindelsen, som forundersøges

- Fremskudt færgehavn ved Tårs, hvor der gennemføres supplerende hydrografiske analyser
- Kattegatforbindelsen, som har gennemgået en indledende forundersøgelse

Disse projektideer er udviklet i forskellig grad og rummer en række alternative løsninger, hvorfor deres påvirkning af vandgennemstrømningen kendes med forskellig præcision og usikkerhed. En oversigt er præsenteret i Tabel 4-1, baseret på de udvalgte anlægsvarianter.

Tabel 4-1 Oversigt over de infrastrukturprojekternes omtrentlige reduktion af vandgennemstrømningen af vand i det lokale stræde og i det samlede overgangsområde. Lokale reduktioner er udtrykt fra 1: (By & Havn, 2020), 2: (DHI & COWI, 2024), 3: (Sund & Bælt, 2024), 4: (Sund & Bælt, 2018), og 5: (Sund & Bælt, 2022).

Infrastruktur	Reduktion lokalt (%)	Reduktion overgangs- område (%)
SH / Lynetteholm ¹	0,25	0,07
Østlig Ringvej ²	0	0
Als-Fyn forbindelsen ³	0,04	0,00
Fremskudt havn Tårs ⁴	0,14 – 0,31	0,09 – 0,20
Kattegatforbindelsen ⁵	0,0 – 0,3	0,00 – 0,22
Sum	NA	0,16 – 0,49

Infrastrukturernes reduktion af vandgennemstrømning i de lokale stræder omregnes til de reduktioner, de giver for hele overgangsområdet. Omregningen tager ikke alle dynamiske forhold i betragtning og er derfor kun omtrentlig, men dog tilstrækkelig og retvisende for den samlede påvirkning af vandgennemstrømningen i overgangsområdet. Til omregningen benyttes en vandføringsfordeling mellem Storebælt: Øresund: Lillebælt på 7 : 3 : 1 (Jacobsen, 1980). Fra denne fordeling kan en lokal reduktion omregnes til en reduktion i overgangsområdet:

$$B_o = \frac{\Delta Q_o}{Q_o} = \frac{Q_l \cdot B_l}{Q_o} = \frac{Q_l}{Q_o} \cdot B_l$$

Hvor B er reduktionen af vandgennemstrømningen, Q er vandføring, indeks o er for overgangsområde og l er for lokalt. Vandføringsforholdet (Q_l/Q_o) foran den lokale reduktion bestemmes vha. 7 : 3 : 1 relationen til at være (for eksempel er $Q_o = 7 + 3 + 1 = 11$):

- 1/11 for Lillebælt
- 3/11 for Øresund
- 7/11 for Storebælt
- 8/11 for sydvestlige Kattegat (Lillebælt og Storebælt) eller Femernbælt

Disse forhold er benyttet til at omregne de lokale reduktioner i Tabel 4-1 til en reduktion i overgangsområdet. Det bemærkes at strømningsreduktionerne for de forskellige projekter er simuleret med et modelområde, der er mindre end hele det stræde, projekterne ligger i. Derfor er de simulerede strømningsreduktioner lidt for store og ligger dermed "på den sikre side" i dette notat.

De lokale reduktioner kan ikke sammenlignes eller adderes, men det kan reduktionerne i overgangsområdet. Den samlede reduktion af de undersøgte infrastrukturprojekter i overgangsområdet er 0,16 – 0,49%.

De to største maksimale reduktioner af vandgennemstrømninger i overgangsområder er fra Kattegatforbindelsen (0,22%) og Fremskudt havn Tårs (0,20%). De bidrager med 86% af den samlede strømningsreduktion i overgangsområdet.

Usikkerheden på de lokale reduktioner er mindst for Lynetteholm, Østlig Ringvej og Als-Fyn og størst for Fremskudt havn ved Tårs og Kattegatforbindelsen (reduktionen fra Kattegatforbindelsen skal f.eks. beregnes med en hydrodynamisk model, der tager hensyn til lagdelingen). Tabel 4-1 er sat op, så usikkerheden er mindst i øverste række og stigende ned gennem rækkerne, og er således størst for Kattegatforbindelsen. Dermed er usikkerhederne størst for de mest betydningsfulde bidrag til den samlede reduktion.

Der er andre projekter end de nævnte infrastrukturprojekter, der vil kunne yde modstand for gennemstrømningen i overgangsområdet, så som udvidelser af havne og vindmølleparker. Eksempler er:

- Rungsted Havn, hvis lokale reduktion af vandgennemstrømningen er bestemt til omtrent 0,0005% (Rungsted Havn, 2024).
- Malmø Havn, se Figur 4-1, hvor reduktionen fra udvidelsen ved en ingeniørvurdering af layout er vurderet at være ganske begrænset og uden betydning for den overordnede vandgennemstrømning (DHI & COWI, 2024). Udvidelsen kan ses i SVEA HOVRÄTT (2024).
- Lillebælt Syd Vindmøllepark. Den lokale reduktion af vandgennemstrømningen af parken findes til at være mindre end 0,006% og vurderes "som helt uden betydning" for vandgennemstrømningen i Lillebælt (se Lillebælt Vind, 2023).
- Aflandshage / Nordre Flint Vindmøllepark. Begge vindmølleparker giver en lokal reduktion på 0,02%, og således vil de tilsammen give en lokal reduktion af vandgennemstrømningen i Øresund på 0,04% og ændringen konkluderes "at være negligibel" (se HOFOR, 2021).

Disse nævnte undersøgte andre projekter reducerer vandgennemstrømningen i overgangsområdet i så ubetydelig grad, at de ikke har betydning for nærværende notats samlede betragtning og redegørelse for en mulig kumulativ påvirkning af vandudveklingen i overgangsområdet, hvorfor de ikke inddrages.



Figur 4-1 Figuren viser området for udvidelsen og tegning af den planlagte udvidelse (udtrukket fra SVEA HOVRÄTT, 2024).

5 Påvirkning af Østersøen fra infrastrukturprojekter

5.1 Baggrund

Den foretrukne tekniske løsning for en fast forbindelse over Femern Bælt var i udgangspunktet et broalternativ, som i et optimeret design ville påvirke vandgennemstrømningen over Gedser-Darss-tærsklen med beregnede 0,5%. Påvirkningen blev simuleret og analyseret med henblik på at vurdere påvirkning på hydrografien og vandmiljøet i indre Østersø (FEHY, 2013). Den lokale påvirkning på 0,5% svarer til en strømningsreduktion på 0,36% for overgangsområdet, hvilket ligger centralt i intervallet 0,16 – 0,49%, estimeret som kumulativ påvirkning fra de i herværende notat undersøgte infrastrukturprojekter.

5.2 Hydrografi

Resultaterne fra analysen af broalternativet i Femern Bælt kan benyttes til at estimere spændet af parametrene (salt og lagdeling), og vurdere påvirkningen af de omfattede infrastrukturprojekter på hydrografien i den indre Østersø, se Tabel 5-1.

Tabel 5-1 Forventede effekter på hydrografien i den indre Østersø, baseret på modelresultater fra broalternativet under Femern Bælt projektet og forholdet mellem er reduktion i overgangsområdet på 0,36% (broalternativ) og intervallet for den kumulative reduktion fra de i notatet betragtede infrastrukturprojekter på 0,16 – 0,49%. Ændringer er angivet for den centrale Østersø.

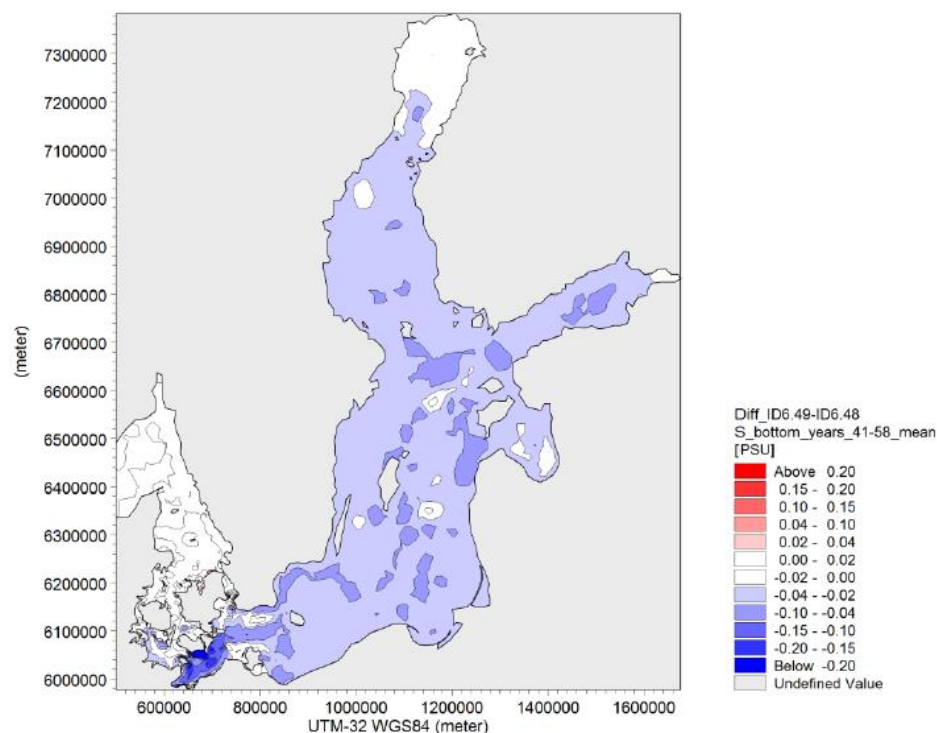
Infrastruktur	Femern Bælt broalternativ	Infrastruktur- projekter
Saltholdighed i overfladen (‰)	-0,03	-0,045 -> -0,015
Saltholdighed ved bunden (‰)	-0,05	-0,075 -> -0,025
Lagdeling (kg m ⁻³)	-0,014	-0,02 -> -0,01

Den afledte effekt fra broalternativet på saltholdighed i overfladen blev beregnet til -0,03 ‰ i store dele af den indre Østersø og på op til -0,08 ‰ i dele af Arkona Bassinet.

I bundvandet blev effekten på saltholdigheden opgjort til -0,05 ‰ i hele Østersøen øst for Arkona, se Figur 5-1.

Effekt på lagdeling blev overordnet beregnet til under -0,02 kg m⁻³, dog med effekter op til 0,08 kg m⁻³ i Arkona Bassinet.

Disse ændringer kan sammenlignes med en gennemsnitlig saltholdighed på 5,5 ‰ og 16,3 ‰ i overflade- og bundvandet og en lagdeling (densitetsforskel mellem øvre og nedre lag) på 5,2 g m⁻³.



Figur 5-1 Ændring i middel saltholdighed i bundvandet for "bro"-scenariet (MIKE regional model, (FEHY, 2023)).

5.3 Vandkvalitet

Som for hydrografien kan resultaterne fra analysen af broalternativet benyttes til at estimere spændet af parametrene (ilt, planteplankton, Secchidybde, cyanobakterier) og på det grundlag vurdere påvirkningen fra de undersøgte infrastrukturprojekter på vandkvaliteten i den indre Østersø, se Tabel 5-2.

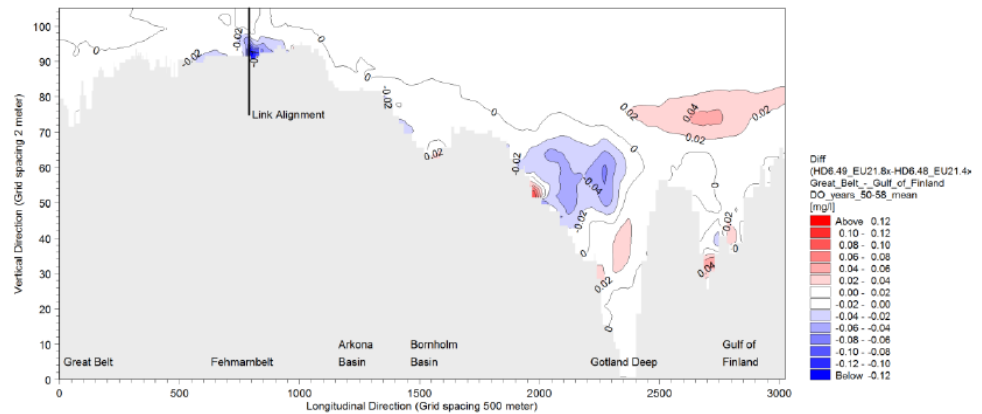
Tabel 5-2 Forventede ændringer på vandkvalitetsparametre i den indre Østersø, baseret på modelresultater fra broalternativet under Femern Bælt projektet og forholdet mellem en strømningsreduktion på 0,36% (broalternativ) og intervallet i reduktioner fra de faste forbindelser på 0,16 - 0,49%. Ændringer i Central Østersø er angivet.

Infrastruktur	Femern Bælt broalternativ	Infrastrukturprojekter
Ilt i bundvandet (mg l ⁻¹)	-0,02	-0,03 - -0,01
Planteplankton (µg l ⁻¹)	+0,01	+0,005 - +0,015
Secchidybde (m)	+0,02	+0,01 - +0,03
Cyanobakterier (µgC l ⁻¹)	+0,2	+0,1 - +0,3

Ved havbunden blev den potentielle ændring i iltkoncentrationen opgjort til -0,02 mg l⁻¹, se Figur 5-2. Effekten er minimal.

I forhold til planteplankton (med ændring på 0,01 µg Chl l⁻¹), vandets gennemsigthed (Secchidybde med en ændring på 0,02 m) og blågrønalger (cyanobakterier med en ændring på 0,2 µgC l⁻¹), blev det ligeledes vurderet, at de tilknyttede effekter fra broen ville være minimale.

Disse ændringer kan sammenlignes med en årlig gennemsnitlig iltkoncentration på 1,6 mg l⁻¹ (standard afvigelse på 2,3 mg l⁻¹) i bundvandet, en årlig gennemsnitlig overflade Chlorophyll koncentration på 2,3 µg l⁻¹, en årlig gennemsnitlig koncentration af blågrønalger på 17-35 µgC l⁻¹, og en årlig gennemsnitlig Secchidibde på 9,8 m.



Figur 5-2 Ændring i middel ilt(bund) langs en langsgående transekt fra Storebælt til Finske Bugt for "bro"-scenariet (MIKE regional model, data 1990-2007).

5.4 Sammenfattet vurdering

Den samlede vurdering af effekter på hydrografi og vandkvalitet for bro-løsningen er, at de ikke vil være betydende for miljøforholdene i den indre Østersø, og at den ikke vil medføre en konflikt med implementeringen af vandrammedirektivet (WFD) og havstrategidirektivet (MSFD) (FEHY, 2013).

Saltholdigheden i bundvandet blev reducerede med ca. 0,03 ‰ i indre Østersø. De andre indikatorer viste ligeledes ubetydelige ændringer, hvorfor den overordnede vurdering var, at effekten vil være uden betydning for Østersøens hydrografi og vandkvalitet.

Vurderingen blev understøttet og perspektiveret ved, at ændringerne er overlejret af naturlige variationer i saltholdighed og vil være umulige at observere i praksis.

Da effekterne på hydrografien og vandkvaliteten fra de i nærværende notat undersøgte faste forbindelser og projekter er af samme størrelsesorden som bro-løsningen i Femern Bælt, kan det antages, at effekterne fra de undersøgte infrastrukturprojekter ikke vil medføre en væsentlig påvirkning af Østersøens hydrografi og vandmiljø eller være i konflikt ift. implementeringen af vandrammedirektivet (WFD) og havstrategidirektivet (MSFD).

6 Påvirkning af Østersøen fra klimaændringer

6.1 Baggrund

Klimabetingede ændringer af Østersøens hydrografi og vandkvalitet bliver løbende evalueret og vurderet af EN CLIME. EN CLIME er et ekspertnetværk om klimaændringer i Østersøregionen, som blev stiftet i 2018 af Helsinki Kommissionen (HELCOM) og Baltic Earth, og som involverer mere end 110 førende forskere fra landene omkring Østersøen.

Forskellige repræsentative "*Concentration Path Ways*" (RCP'er) bruges til at beskrive forskellige klima scenarier, afhængigt af udviklingen i udledningen af drivhusgasser de kommende år og den heraf afledte effekt på klimaet i år 2100.

RCP'erne inkluderer 3 scenarier:

- "Indsats" scenarie med global opvarmning under 2°C over præindustrielle temperaturer (RCP2.6),
- "Worst case" scenarie med høje emissioner det svarer til global opvarmning uden klimaindsatser på 4,5°C i år 2100 (RCP8.5), og
- Et mellemscenarie med global middeltemperaturstigning på 2-3°C i år 2100 (RCP4.5).

6.2 Klimabetingede ændringer

I henhold til EN CLIMEs arbejde og RCP2.6, RCP4.5 og RCP8.5 (HELCOM, 2021), kan følgende klimabetingede ændringer forventes.

6.2.1 Global vandstandsstigning

Den globale vandstandsstigning vil øges fra den nuværende stigning. Aktuelle fremskrivninger estimerer, at Østersøniveauet stiger til omkring 87% af den globale fremskrivning. Den globale gennemsnitlige vandstandsstigning i år 2100 er 43 cm (29 til 56 cm, RCP2.6) til 84 cm (61 til 110 cm, RCP8.5) over referenceniveau. Den aktuelle globale stigning er på 3-4 mm år⁻¹. Landhævning som vist i Figur 3-12 vil modvirke effekten af havspejlsstigning i store dele af Østersøen, men den accelererende havspejlsstigning har stor betydning i overgangsområdet.

6.2.2 Nedbør og afstrømning

Gennemsnitlig nedbør forventes at stige i fremtiden. Mod nord vil den relative stigning være størst om vinteren, ligesom de fleste simuleringer viser stigende sommernedbør i de nordlige dele, alt imens prognoserne for de mellemliggende og sydlige dele af regionen er usikre.

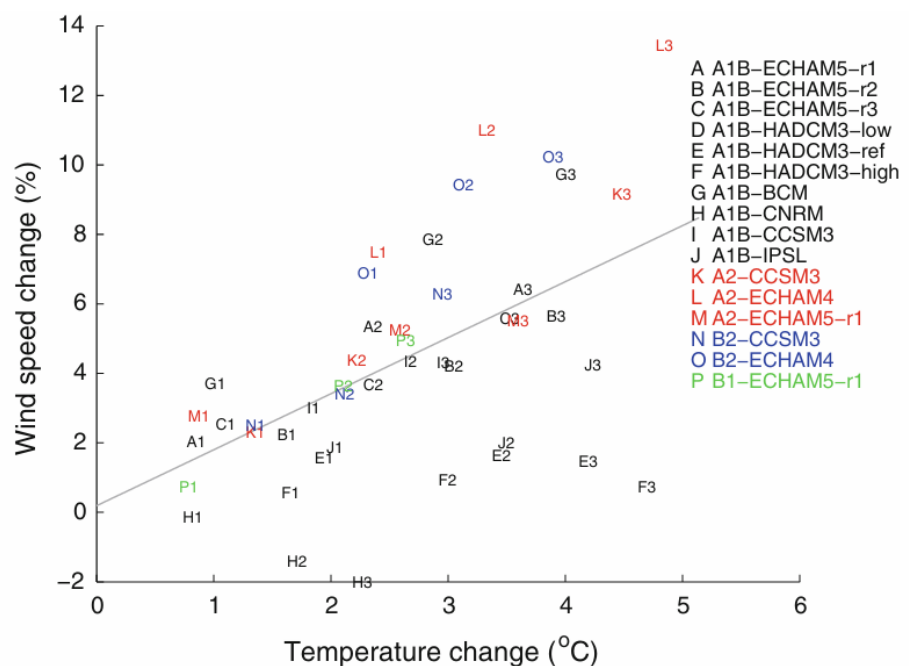
Der er ikke observeret en statistisk signifikant ændring i afstrømning til Østersøen i det seneste århundrede omend der er store variationer mellem forskellige regioner og årtier. I den nordlige Østersø og Finske Bugt, er afstrømningen øget pga. temperaturstigninger og øget nedbør. Mod syd er den årlige afstrømning

derimod faldet som resultat af øget fordampning over land fra temperaturstigninger. I forhold til sæsonvariationer, så er vinterafstrømningen steget, mens forårsafstrømningen er faldet i løbet af det 20. århundrede. Temperaturstigninger kan resultere i en øget fordampning, men bevirker omvendt også at atmosfæren kan indeholde en større mængde af vand, der kan resultere i kraftigere nedbørshændelser.

I år 2100 forventes den samlede afstrømning til Østersøen at stige med 2-22% (HELCOM, 2021). Denne øgning forventes primært fra Østersøens nordlige opland, mens der forventes et fald i afstrømning i den sydlige del. Vinterafstrømningen vil stige pga. øget afsmeltning.

6.2.3 Vind

På grund af store variationer i vindklimaet i Østersøregionen, er det vanskeligt at identificere en samlet tendens i middelvindhastighed, hvilket også gælder for klimafremskrivninger. Prognoserne indikerer således en svag, men signifikant, øgning i vindhastighed i efteråret og et fald i foråret. Visse undersøgelser påpeger øgning af vindhastigheder i områder, hvor der ikke længere er havis. Et analyseresultat fra (BACC II, 2015) er vist i Figur 6-1.



Figur 6-1 Sammenligning af stigning i årlige middel vindhastighed afhængig af lufttemperaturstigningen over Østersøen.

Bogstaverne relaterer til scenariet og tallet til prognoseperiode:

1: 2011-2040

2: 2041-2070

3: 2071-2100

Hældning $k=1,6\%/^{\circ}\text{C}$, Korrelation $r=0,53$

(BACC II, 2015)

6.2.4 Vandtemperatur

Scenariesimuleringer for Østersøen giver en temperaturstigning i havoverfladen på 1,1°C (0,8-1,6°C, RCP2,6) til 3,2°C (2,5-4,1°C, RCP8,5). Tallene uden for parentes angiver ændringer i middelværdi mens intervallerne angiver 5% og 95% percentiler for de anvendte 9 klimamodeller) ved udgangen af dette århundrede sammenlignet med 1976-2005. Temperaturstigningen i havoverfladen ved slutningen af århundredet overstiger markant den naturlige variabilitet i alle scenarier.

For lufttemperaturen er 50% fraktilen i (BACC II, 2015) fundet til ca. 3°C i år 2100 over den indre del af Østersøen. Stigningen i overfladetemperaturen er i samme publikation simuleret til ca. 3,5°C.

6.3 Klimabetingede ændringer af hydrografien

Østersøens hydrografi er beskrevet i kapitel 3, herunder hvordan Nordsø-Østersø systemet styres og drives af:

- Dybdeforhold: Indsnævninger, tærskler, bassiner
- Ydre oceanografiske forhold: Vandstand, tidevand, saltholdighed
- Hydrologi: Afstrømning fra land (ferskvand)
- Meteorologi: Vind, lufttryk og nettonedbør

Det er i afsnit 6.2 beskrevet, hvorledes alle disse styrende og drivende forhold (dvs. de oceanografiske, hydrologiske og meteorologiske forhold) ændres af klimæændringer.

Vanddybderne i overgangeområdet vil øges med vandstandsstigningen, hvilket vil mindske modstanden i overgangsområdet en størrelsesorden mere end modstanden fra de undersøgte infrastrukturprojekter (Jakobsen et al., 1996, Jakobsen & Trébuchet, 2000). I (Østlig Ringvej, 2024) vurderes påvirkningen på modstanden i Øresund for den øgede vanddybde fra 1993-1994 til 2022. Det findes, at reduktionen i modstanden er flere gange større og modsatrettet end den som Øresundsforbindelsen ville have haft uden kompensationsafgravninger. Den øgede vanddybde giver en negativ strømningsreduktion, altså modsat af de undersøgte infrastrukturprojekter, og en størrelsesorden mere end de undersøgte infrastrukturprojekter. Hvis en nulløsning ville blive krævet alene for klimabetinget vandstandsstigning, skulle gennemstrømning i overgangsområdet begrænses.

Vandtemperaturen ved overfladen i Østersøen vil stige. Da det også gør sig gældende i Nordsøen, dvs. det vand der strømmer ind i Østersøen og skaber det nedre lag, så vil temperaturen også stige i det nedre lag, men med en forsinkelse (adskillige år) i forhold til ved overfladen. Den højere vandtemperatur kan bevirke, at det indstrømmende Nordsøvand indeholder mindre ilt og at ilten alt andet lige vil forbruges hurtigere efter at være strømmet ind i Østersøen.

I (BACC II, 2015) på baggrund af (Meier, et al., 2012) er temperaturstigningen for perioden 2069-2098 simuleret til at være ca. 2,5°C højere end i perioden 1978-2007. For bundvandet vil temperaturstigningen være ca. 1,8°C.

6.3.1 Saltholdighedsændring pga. vandspejlsstigning

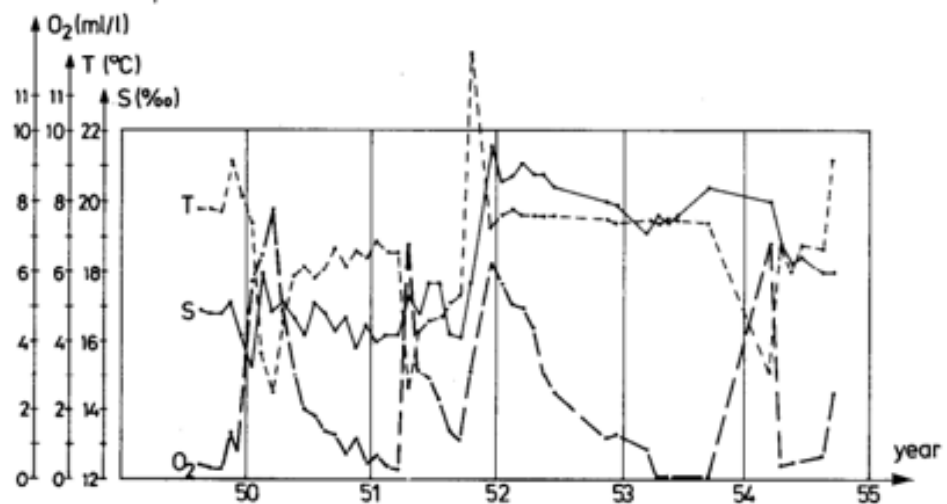
En øget vandstand i overgangsområdet vil give et større gennemstrømnings-tværsnit og dermed en større gennemstrømning. Dermed vil den generelle saltholdighed i Østersøen stige. Fordelingen af saltholdighed i øvre og nedre lag i Østersøen afhænger af Østersøens interne blandingsprocesser, der i væsentlig grad er vindafhængige. En vurdering af saltholdighederne i øvre og nedre lag i Østersøen kræver derfor såvel en nøje simulering af strømningsforholdenes ændring på grund af vandstandsstigninger i overgangsområdet som en simulering af Østersøens interne blandingsprocesser.

Effekten af en alene stigende vandstand på saltholdighederne i indre Østersø er simuleret i (Meier, et.al., 2017). Her findes at:

Scenarie	Havvandsstigning i år 2100 (m)	Ændring i overflade saltholdighed (‰)	Ændring i bundlags saltholdighed (‰)
S50	0,5	+0,68	+0,9
S100	1,0	+1,31	+1,75

Der er ikke angivet usikkerhedsmarginer til ovennævnte tabel, men med udgangspunkt i (BACC II, 2015) skønnes den at være i størrelsesorden 30%. Til den videre sammenligning af de forskellige processers påvirkning anvendes det mest central scenarie, dvs. S50.

Ændrede indstrømninger af saltvand fra Nordsøen til Østersøen initierer en række processer i Østersøen, som er illustreret i nedenstående Figur 6-2 (Jakobsen, 1991).



Figur 6-2 Saltholdighed, temperatur og iltindhold i 100 m dybde i Bornholmer Dybet fra Nautisk-Meteorologiske Årbøger (Jakobsen, 1991).

Variation af saltholdighed, temperatur og ilt i 100 m dybde i Bornholmer Bassinet fra 1949 til og med 1954 er vist i Figur 6-2. Indstrømningshændelser ses tydeligt i iltindholdet, som stiger kraftigt ved indstrømning til den indre Østersø, og således kan fire større indstrømninger observeres. Generelt stiger saltholdigheden også i forbindelse med indstrømningerne. Indstrømningen omkring årsskiftet 1951-52 bevirker en kraftig øgning af saltholdigheden. Den høje

saltholdighed bevirker, at denne vandmasse har en høj densitet, og der vil derfor oftest (statistisk) gå en længere periode før en ny indstrømning kan udskifte denne vandmasse og derfor forbliver vandmassen i denne dybde i en længere periode, hvor den kun fortyndes langsomt (de vertikale transportprocesser er meget små i denne dybde). Fra årsskiftet 1951-52 falder saltholdigheden fra 21,5 ‰ til 20 ‰ midt 1953, hvilket stadig er en høj saltholdighed, mens ilten falder kraftigt fra 6 ml/l til 0 mg/l. Således kan kraftige indstrømninger bevirke en umiddelbar øgning af ilten og fjerne iltvind, men til gengæld varer iltsvindet i de dybere lag i længere tid pga. den øgede densitet. Større indstrømninger har derfor en umiddelbar positiv effekt på iltindholdet, men altså også på længere sigt en negativ effekt pga. en øget opholdstid. Der findes dog også indstrømninger, hvor øgningen af hverken saltholdigheden eller iltkoncentrationen er så markant som i 1951-52. Det er en kompliceret dynamik, og alt efter den aktuelle kombination af de forskellige parametre kan udfaldet af hændelserne være forskelligt.

6.3.2 Saltholdighedsændring pga. ferskvandsafstrømning

Afstrømning og nettonedbør forventes at ville øges, hvilket isoleret set (dvs. hvis kun ændringerne fra afstrømning tages i betragtning) iht (BACC II, 2015) vil føre til lavere saltholdighed i både øvre og nedre lag, en lidt højere vandstand i indre Østersø og større netto-udstrømning. Simuleringerne er baseret på en ferskvandsafstrømning på ca. +20% (pers. Com. Meier, 2024), som ligger i den øvre ende af de forventede ændringer. (HELCOM, 2021) forventer ændringer mellem 0% og 22%, som i middel er omkring 10%, dvs. omtrent den halve ændring.

Saltholdighederne vil iht. til denne simulering ændres med ca. $(-1,6 \pm 0,3)$ ‰ i overfladen og ca. $(-1,6 \pm 0,6)$ ‰ ved bunden. Under antagelse af at ændringen i ferskvandsafstrømningen vil være svarende til middelværdien af HELCOM's forventningsinterval) dvs. 10% i år 2100, forventes tilsvarende den halve ændring i overflade og bund, dvs. $(-0,8 \pm 0,2)$ ‰ ved overfladen og $(-0,8 \pm 0,3)$ ‰. Til den videre sammenligning af de forskellige processers påvirkning anvendes det mest centrale scenarie, dvs. det, der svarer til en 10% øgning af ferskvandsafstrømning.

Påvirkningerne af ændret ferskvandstilstrømning er verificeret ved to uafhængige metoder i det følgende:

1. Ved inspektion af Figur 3-6 findes, at en stigning af middel ferskvandsafstrømning på 20%, svarende til en ændring fra 15.000 m³/s til 18.000 m³/s, vil bevirke en sænkning af saltholdigheden ved Anholt på ca. 1,3 ‰. Det forventes, at saltholdigheden ved Anholt vil være påvirket i mindre grad end saltholdigheden i Gotland Bassinet af en øget afstrømning fra land til Østersøen. En ændring af 1,3 ‰ i forhold til 1,6 ‰ må derfor siges at være i overensstemmelse med forventningen.
2. I (Pedersen & Møller, 1981) blev en 5% reduktion af ferskvandsafstrømningen undersøgt med det resultat, at saltholdigheden i Gotland Bassinet overflade vil tiltage med 0,3 ‰. En stigning af ferskvandsafstrømning på 20% (4 gange så stor og med modsat fortegn) vil derfor betyde en reduktion af overfladesaltholdigheden på ca. 1,2 ‰. En ændring på 1,2

‰ i forhold til 1,6 ‰ må derfor siges at være i overensstemmelse med forventningen.

Resultatet af de to helt uafhængige tilgange er vist i nedenstående Tabel 6-1. Tabel 6-1 bekræfter dermed størrelsesorden af de forventede ændringer simuleret i (BACC II, 2015).

Tabel 6-1 Tre forskellige modellerings estimat på konsekvensen af en 20% stigning af ferskvandstilførslen til Østersøen på overfladesaltholdigheden.

Kilde	Ændring af overfladesaltholdighed (‰)	Lokalitet
Jakobsen et al., 1996	-1,3	Anholt
Pedersen & Møller, 1981	-1,2	Indre Østersø
BACC II, 2015*	-1,6	Indre Østersø

* Med antagelse om en stigning af ferskvandstilførslen på ca. 20% i år 2100 i forhold til år 2000.

De prognosticerede klimaændringer vil være betydende for hydrografien i indre Østersø, og i flere henseender vil de være modsatrettede ændringer forårsaget af infrastrukturprojekterne, se oversigt i Tabel 6-2.

Tabel 6-2 Sammenligning af påvirkningen på indre Østersø fra undersøgte infrastrukturprojekter og klimabetingede klimaændringer.

Påvirkning af infrastrukturprojekter	Påvirkning af klimaændringer
Øger modstanden i overgangsområdet, strømningsreduktion er 0 – 0,5%.	Mindsker modstanden i overgangsområdet, strømningsforøgelsen er omkring 7%
Mindsker indstrømningerne af højsalint Nordsøvand til indre Østersø. Reduktionen er 0 – 0,5%.	Øger indstrømningerne (øget vandstand og øget vind i efteråret) af højsalint Nordsøvand til indre Østersø med ca. 7%, dvs. betydeligt mere end forbindelserne reducerer indstrømning.
Ingen påvirkning på afstrømning og nettonedbør.	Øger afstrømning og nettonedbør, hvilket alt andet lige vil mindske saltholdigheden i øvre og nedre lag, se Figur 3-6.
Ingen påvirkning af vandtemperatur.	Øger vandtemperaturen, hvilket kan mindske iltindholdet i overfladevandet i Nordsøen og forøge hastigheden af iltforbruget ved bunden i Østersøen.

6.4 Sammenfattende vurdering

De hydrografiske påvirkninger på Østersøen fra undersøgte marine infrastrukturprojekter er sammenlignet med tilsvarende påvirkninger fra klimaændringer indtil perioden 2069-2098, se Tabel 6-3 og Tabel 6-4. De hydrografiske påvirkninger omfatter strømningsreduktion samt saltholdighed i øvre og nedre lag.

Den mest direkte sammenligning mellem effekterne fra infrastrukturprojekter og klimaændringer er ændringen af strømningsmodstanden i overgangsområdet, fordi ændringerne forgår det samme sted (i overgangsområdet) og fordi de har den samme påvirkning (men er modsatrettede) af gennemstrømningen, se Tabel 6-3. Strømningsmodstanden fra infrastrukturprojekterne vil i overgangsområdet være én til to størrelsesordener mindre end den strømningsøgning, som klimaændringernes havspejlstigning vil medføre. Påvirkningen af infrastrukturprojekterne på gennemstrømningen er dermed ubetydelige og derudover modsat virkende klimaændringernes påvirkning af gennemstrømningen.

Tabel 6-3 Sammenfattende oversigt over effekterne på grund af undersøgte infrastrukturprojekter og klimaændringerne på strømningsreduktion i overgangsområdet.

Effekt	Infrastrukturprojekter	Vandstands- betingede ændringer (år 2100)	Afstrømnings- betingede ændringer (år 2100)	Samlet klima- ændringer (år 2100)
Strømningsreduktion (%)	0,16 -> 0,49 ¹⁾	-9,2 -> -4,6*	-	-9,2 -> -4,6*

* Skøn baseret på afsnit 6.3 og (Jakobsen et al., 1996, Jakobsen & Trébuchet, 2000, samt Østlig Ringvej, 2024)

1) Fra Tabel 4-1

Med hensyn til saltholdighederne i Østersøens overflade og bund ses i Tabel 6-4, at effekterne fra de klimabetingede ændringer af vandstand og afstrømning begge er behæftet med en væsentlig usikkerhed. Da de to processer har modsat virkning på saltholdighederne kan deres samlede effekt være begrænset. Derudover er den behæftet med en ganske stor usikkerhed. De projektbetingede effekter på saltholdighederne er væsentlig mindre end klimaændringernes effekter. Udfaldsintervallet for de klimabetingede effekter er en størrelsesorden større end de projektbetingede effekter. Ændringerne, som projekterne vil have på saltholdighederne i den centrale Østersø, er i (FEHY, 2013) vurderet at være uden betydning, se afsnit 5.4.

Det store forventningsinterval for saltholdighed i øvre og nedre lag (Tabel 6-4) er i overensstemmelse med konklusionen i (Meier, et.al., 2022b), hvor han skriver: "In contrast to previous scenario simulations, recent scenario simulations considered the impact of the global mean SLR [Sea Level Rise] on Baltic Sea salinity, which for the ensemble mean salinity would more or less completely compensate for the effects of the projected increasing river runoff. However, as future changes in all three drivers of salinity (wind, runoff and SLR) are highly uncertain, the spread in the salinity projections of the various ESMs [Earth System Model] is larger than any signal".

Tabel 6-4 Sammenfattende oversigt over effekterne på grund af undersøgte infrastrukturprojekter og klimaændringerne på saltholdigheder i den indre Østersø (Gotland Bassinet).

Effekt	Infrastrukturprojekter	Vandstands- betingede ændringer (år 2100)	Afstrø- mingsbetin- gede æn- dringer (år 2100)	Samlet kli- maændrin- ger (år 2100)
Saltholdighed øvre lag (‰)	-0,045 -> -0,015 ²⁾	0,5 -> 0,9 ⁴⁾	-1,0 -> -0,6 ³⁾	-0,5 -> +0,3
Saltholdighed nedre lag (‰)	-0,075 -> -0,025 ²⁾	0,6 -> 1,2 ⁴⁾	-1,1 -> -0,5 ³⁾	-0,5 -> +0,7

2) Fra Tabel 5-1

3) (BACC II, 2015)

4) (Meier, 2016)

Det bemærkes fra Tabel 6-4, at klimaændringerne bevirker en uændret til en ganske svag stigende lagdeling i Østersøen, hvilket også er forventet i HELCOM (2021) - også over de seneste årtier er der observeret en øget indstrømning til Østersøen. De samlede klimatiske ændringer (herunder temperaturstigninger) kan ifølge HELCOM (2021) påvirke Østersøens marine økosystem negativt (HELCOM, 2021).

7 Diskussion

Dette notat bygger på eksisterende viden og analyser om effekten af strømningsmodstande fra infrastrukturprojekter og deres effekt på hydrografien i Østersøen sammenlignet med effekten af klimaændringer. Notatet holder sig til de overordnede og generelle hydrografiske processer.

Det understreges, at især prognosticerede værdier for år 2100 bygger på en lang række forudsætninger, som hver især har en stor variationsbredde. Det brede forventningsinterval af disse resultater skal derfor tages i betragtning ved fortolkning af resultaterne.

Vurderingerne i notatet viser, at strømningsreduktionen fra infrastrukturprojekterne i overgangsområdet vil være én til to størrelsesordener mindre end den øgning af gennemstrømningen som klimaændringernes havspejlstigning vil medføre. Dermed vil projekterne 1) have en betydelig mindre effekt end havspejlstigningen og 2) vil effekten virke modsat af effekten af havspejlstigningen.

Med hensyn til effekten på saltholdigheden i den indre Østersø indikerer ovenstående, at klimabetingede ændringer i Østersøens saltholdigheder vil være 2 til 3 gange større omkring år 2100 end ændringerne, der skyldes de undersøgte infrastrukturprojekter. Denne størrelsesorden er dog en sum af to overlejlrede og modsatrettede processer: Vandstandsstigningen, der vil give højere saltholdigheder og stigningen i ferskvandsafstrømningen, som vil give lavere saltholdigheder. Den resulterende lille differens mellem to store tal, hvoraf klimaforudsigelserne for afstrømning i år 2100 er behæftet med den relativ største usikkerhed, er derfor knyttet til en betragtelig usikkerhed.

Da variationsbredden (usikkerheden) på de klimatingede ændringer af saltholdighederne i Østersøen i år 2100 er en størrelsesorden større end klimaændringernes centrale estimat, anses en sammenligning mellem effekten af projekterne og effekterne af klimaændringerne på nuværende grundlag ikke meningsfuld.

Den indre Østersø er karakteriseret ved monitoreringsstationen BY15 i det østlige Gotland Bassin, som anvendes af HELCOM samarbejdet. Stationen anses for repræsentativ for den indre Østersø fordi den ligger centralt i Østersøen og fordi overfladens saltholdigheden varierer væsentlig mindre i denne del af Østersøen sammenlignet med variationerne i f.eks. overgangsområdet mellem Nordsø og Østersø, se f.eks. Figur 3-3.

Med hensyn til den særskilte simulering af effekterne fra hhv. havspejlstigning og ferskvandsafstrømning bemærkes, at en addition af de to processers effekt bygger på en antagelse af, at ændringerne er så små, at de faktisk kan adderes (superponeres). Tages de generelle usikkerheder i betragtning, anses denne antagelse for at være gyldig her.

8 Referenceliste

- BACC II Author Team, 2015: "Second assessment of climate change for the Baltic Sea Basin", Baltic Earth, SpringerOpen. <https://link.springer.com/book/10.1007/978-3-319-16006-1>
- By og Havn, 2020: Anlæg af Lynetteholm. VVM – Teknisk Baggrundsrapport nr. 1. Hydrauliske undersøgelser. Udarbejdet for Udviklingselskabet By & Havn I/S af DHI.
- Christensen, O., B., Kjellstrøm, E., Dieterich, C., Gröger, M., Meier, H., E., M., 2021: "Atmospheric regional climate projections for the Baltic Sea region until 2100". Earth System Dynamics, 13, 133-157, 2022.
- DCE, 2024: <https://miljoedata.miljoportal.dk/?et=Datamart%20Feltm%C3%A5ling%20Marin&mt=Marin&polygonId=2ab578ec-cb70-43a9-b4d5-319a9305cc8e>
- DHI & COWI, 2024: "Ingeniørvurdering af layout".
- Farmer, D., J.S. Møller, 1990: Measurements and Modelling in the Great Belt: A Unique Opportunity for Model Verification. The Physical Oceanography of Sea Straits. L. Pratt (ed.) NATO ASI series C. Vol. 318. Kluwer 1990.
- FEHY, 2013: Fehmarnbelt Fixed Link EIA. Marine Water. Hydrography of the Fehmarnbelt Area - Impact Assessment. Report No. E1TR0058 - Volume I. Prepared for: Femern A/S By: DHI/IOW Consortium in association with LICEngineering, Bolding & Burchard and Risø DTU.
- Femern, 2012: Fehmarnbelt Hydrography. Fehmarnbelt Fixed Link. Hydrographic services. Hydrography of the Fehmarnbelt Area. E1TR0058 – Volume II. Udarbejdet for Femern A/S af DHI/IOW Consortium in association with LICEngineering, Bolding & Burchard and Risø DTU (se afsnit 6.1.2, samt tabel 6.2).
- Fyns Amt, 1996: "Kystvande 1995, Næringsstofftilførsler, Vandkvalitet og forureningstilstand, Årsager og udvikling 1976-1995", Vandmiljøovervågning, Fyns Amt, Maj 1996.
- HELCOM, 1986: "Water Balance of the Baltic Sea" Helsinki Commission, Baltic Marine Environment Protection Commission, Baltic Sea Environment Proceedings, 16. ISSN 0357-2994.
- HELCOM, 2016: "Total and regional runoff to the Baltic Sea", HELCOM Baltic Sea Environmental Fact Sheet 2016. <https://helcom.fi/wp-content/uploads/2020/07/BSEFS-Total-and-Regional-Runoff-to-the-Baltic-Sea-2015.pdf>
- HELCOM, 2021: "Climate change in the Baltic Sea. 2021. Fact Sheet. Baltic Sea Environmental Proceedings no. 180. HELCOM/BalticEarth 2021.

- HOFOR, 2021: Aflandshage / Nordre Flint Vindmøllepark. Baggrundsrapport for kystmorfologi, klapning, hydraulik mv. Udarbejdet for HOFOR Vind A/S af NIRAS.
- IOW, 2016: "Hypoxia and anoxic regions in the Baltic Sea, 1969-2015, Meereswissenschaftliche Berichte, Marine Science Reports, No. 100 2016", Leibnitz-Institut für Ostseeforschung Warnemünde, 2016.
- Jacobsen, T.S., 1980: The Belt Project. Sea water exchange of the Baltic. Measurements and methods. The National Agency of Environmental Protection, Denmark. ISBN 87-503-3532-4.
- Jakobsen, Fl., 1991: Bornholmer Dybets hydrografi. Havforskning fra Miljøstyrelsen, Nr. 8.
- Jakobsen, Fl., 1997: Hydrographic investigation of the Northern Kattegat front. Continental Shelf Research, 17 (5), 533-554.
- Jakobsen, Fl., I.S. Hansen, N.-E.O. Hansen & F. Østrup-Rasmussen (2010). Flow resistance in the Great Belt, the biggest strait between the North Sea and The Baltic Sea. Estuarine, Coastal and Shelf Science, Vol. 87, 325-332.
- Jakobsen, Fl., J.S. Møller, 1996: Transporten gennem Lillebælt (in Danish). Vand & Jord, No. 6, pp. 252, 253 & 259.
- Jakobsen, Fl., N.H. Petersen, H.M. Petersen, J.S. Møller, T. Schmidt, T. Siefert, 1996: Hydrographic investigations in the Fehmarn Belt in connection with the planning of the Fehmarn Belt link. Proceedings of the Baltic Marine Science Conference 1996 (Rønne, Denmark), 10 pp. Published in ICES Cooperative Research Report 257, 2003, 179-189.
- Jakobsen, Fl., C. Trébuchet, 2000: Observations of the transport through the Belt Sea and an investigation of the momentum balance. Continental Shelf Research, Vol. 20, pp. 293-311.
- Kessel H. & Punning J.-M., 1972: Pilk Läänemere geoloogilise minevikku Ecstis (The geological past of the Estonian part of the Baltic Sea — An overview). Eesti Loodus 10: 612-616 (in Estonian, English summary)
- Lehmann, A., Myrberg, K., Post, P., Chubarenko, I., Dailidiente, I., Hinrichsen, H.H., Hüsey, K., Liblik, T., Meier, H.E.M., Lips, U., Bukanova, T., 2022: "Salinity dynamics of the Baltic Sea", Earth System Dynamics, 13, 373-392, 2022.
- Lillebælt Vind, 2023: Lillebælt Syd Vindmøllepark. Miljøkonsekvensrapport for vindmøllepark til havs. Bilag F1 Hydrografi og Vandkvalitet. Udarbejdet for Lillebælt Vind A/S af COWI.
- Marine Finland, 2024: [The Baltic Sea in numbers - Marinefinland.fi](https://www.marinefinland.fi/en/the-baltic-sea-in-numbers).

- Meier H.E.M, Hordoir R, Andersson HC, Dieterich C, Eilola K, Gustafsson BG, Höglund A, Schimanke S (2012b) Modeling the combined impact of changing climate and changing nutrient loads on the Baltic Sea environment in an ensemble of transient simulations for 1961-2099. *Clim Dynam* 39:2421-2441.
- Meier, H.E.M., Höglund, A., Eilola, K., Almroth-Rosell, E., 2017: "Impact of accelerated future global mean sea level rise on hypoxia in the Baltic Sea". *Clim.Dyn.* (2017), 49: 163-172.
- Meier, H.E.M., Kniebusch, M., Dieterich, C., Gröger, M., Zorita, E., Elmgren, R., Myrberg, K., Abola, M., Bartosova, A., Bonsdorff, E., Börgel, F., Capell, R., Carlén, I., Carlund, T., Carstensen, J., Christensen, O.B., Dierschke, V., Frauen C., Frederiksen, M., Gaget, E., Galatius, A., Haapala, J., J., Halkka, A., Hugelius, G., Hünicke B., Jaagus, J., Jüssi, M., Käyhkö, J., Kirchner, N., Kjellström, E., Kulinski, K., Lehmann, A., Lindström, G., MayW., Miller, P.A. Mohrholz, V., Müller-Karulis, B., Pavón-Jordán, D., Quante, M., Reckermann, M., Rutgersson, A., Savchuk, O., P., Stendel, M., Tuomi, L., Viitasalo, M., Weisse, R., Zhang, W., 2022: "Climate change in the Baltic Sea region: a summary", *Earth System Dynamics*, 13, 457-593, 2022.
- Meier, H.E.M., Dieterich, C., Gröger, M., Dutheil, C., Börgel, F., Safonova, K., Christensen, O.B., Kjellström, E., 2022b: "Oceanographic regional climate projections for the Baltic Sea until 2100", *Earth Syst. Dynam.*, 14, 159-199, 2022.
- Meier, H.E.M., Barghorn, L., Börgel, F., Gröger, M., Naumov, L., Radtke, H., 2023: "Multidecadal climate variability dominated past trends in the water balance of the Baltic Sea watershed". *Climate and atmospheric science*, (2023)6:58; <https://doi.org/10.1038/s41612-023-00380-9>
- Miljøstyrelsen, 1976: "Bæltprojektet, Fysiske undersøgelser, Figurer", Maj 1976. <https://www.geohav.dk/pdfarchive/397299813741856.pdf>
- Müller, D.J., 2018: "Ocean Acidification in the Baltic Sea: Involved Processes, Metrology of pH in Brackish Waters, and Calcification under Fluctuating Conditions", Thesis for: PhD, Advisor: Gregor Rehder, Bernd Schneider, DOI:10.18453/rosdok_id00002303, ETH Zürich, January 2018. ([PDF](#)) [Ocean Acidification in the Baltic Sea: Involved Processes, Metrology of pH in Brackish Waters, and Calcification under Fluctuating Conditions \(researchgate.net\)](#).
- Møller, J.S., N-E. Ottesen Hansen, 1988: The Great Belt Link Compensations dredging design. *Dredging and Port Construction*, 1988:15:7.
- Ottesen Hansen, N.E., J.S. Møller, 1990: Zero Blocking Solution for the Great Belt Link. *The Physical Oceanography of Sea Straits*. L. Pratt (ed.) NATO ASI series C. Vol. 318. Kluwer 1990.

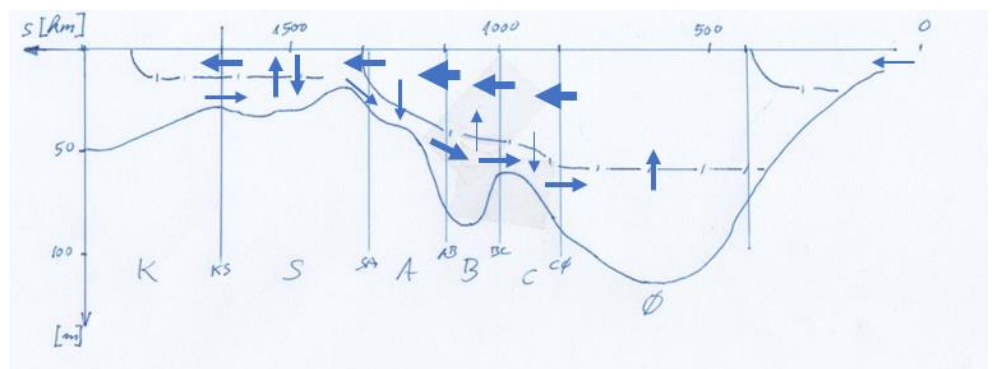
- Pedersen, F.B., Møller, J.S., 1981: "Diversion of the River Neva How will it Influence the Baltic Sea, the Belts and Kattegat". Nordic Hydrology, 12, 1981, 1-20.
- Rungsted Havn, 2024: Strømningsmodstand fra udvidelse af Rungsted Havn. Udarbejdet for Rungsted Havn af DHI.
- Saraiva, S., Meier MHE, Andersson H, Höglund A, Dieterich C, Gröger M, Hordoir R, Eilola K, 2018: Baltic Sea ecosystem response to various nutrient load scenarios an present and future climates", Climate Dynamics 2018.
- SMHI, 2023: "Framtida vattenstand längs kusten".
<https://www.smhi.se/kunskapsbanken/oceanografi/vattenstand-och-klimat/framtida-vattenstand-langs-sveriges-kust-1.133483>
- SMHI, 2024: [Landhöjning och vattenstånd | SMHI](https://www.smhi.se/kunskapsbanken/oceanografi/vattenstand-och-klimat/landhojning-och-havsvattenstand-1.3437);
<https://www.smhi.se/kunskapsbanken/oceanografi/vattenstand-och-klimat/landhojning-och-havsvattenstand-1.3437>
- Sund & Bælt, 2018: Undersøgelse af fremskudt færgehavn ved Tårs. Udarbejdet for Sund & Bælt Holding A/S af COWI.
- Sund & Bælt, 2022: Forundersøgelse af en Kattegatforbindelse, kyst-kyst. Miljøundersøgelser - vej. Udarbejdet for Sund & Bælt Holding A/S af Rambøll.
- Sund & Bælt, 2024: Hydrografisk undersøgelse af Als-Fyn forbindelsen. Beregning af gennemstrømningsmindskelsen for en bro- og for en bro-ø-tunnel løsning. Udarbejdet for Sund & Bælt Holding A/S af DHI.
- SVEA HOVRÄTT (2024) DOM dateret 2024-01-26. Mål nr. M 2327-22.
- Svensson, A., 1975: "Physical and Chemical Oceanography of the Skagerrak and Kattegat". Fishery Board of Sweden, Institute of Marine Research, Report No.1, 88 pp.
- Wübbler, Ch., Kraus, W., 1979: "The two-dimensional seiches of the Baltic Sea", Oceanologica Acta, 1979, Vol 2, No. 4.
- Østlig Ringvej, 2023: Hydrografi, kyst og vandkvalitet. Gennemgang af erfaringer fra graveoperationer i forbindelse med Øresundsforbindelsen. Udarbejdet for Østlig Ringvej af COWI og DHI.
- Østlig Ringvej, 2024: Hydrografi, kyst og vandkvalitet. Opsætning, kalibrering og validering af Øresundsmodellen. Udarbejdet for Østlig Ringvej af COWI og DHI.

Bilag A Baggrundsviden

Fra den finsk-svenske grænse ved den Botniske Bugt til Skagen er den samlede længde af akse ca. 2000 km. På det bredeste sted er den ca. 300 km bred. Udløbet foregår gennem smalle bæltter og sundet, hvor Storebælt på dets smalleste sted ved Sprogø er ca. 15 km bred, sundet ved Helsingør ca. 3½ km bred og Lillebælt på smalleste sted kun ca. 0,6 km bred.

Østersøens samlede overflade er 392.000 km², dets vandvolumen er 21.000 km³ med en maksimal dybde på 459 m og en gennemsnitlig dybde på 54 m, (Marinefinland, 2024).

Østersøens vandudveksling med Kattegat og Nordsøen er yderligere begrænset i de danske stræder, fordi de til dels er meget lavvandede. Således er vanddybden iht. søkort ved Gedser Rev (Darss tærskel) kun omtrent 15 m, mens den naturlige dybde over Drogden tærsklen (Kastrup og Malmø) kun er ca. 6 m. Smalle, uddybede sejlrender er 9 m dybe (Drogden Renden og Flinterenden).



Figur 8-1 Middelcirkulationsvandføringer i Østersøen, efter (Pedersen & Møller, 1981). (Pilenes tykkelse og retning svarer til vandføringerne).

Figuren illustrerer, hvordan ferskvandstilstrømningen til Østersøen på 15.000 m³/s, der sammen med indstrømmende saltvand fra Kattegat, giver anledning til interne vandføringer mellem vandområderne og mellem lagene. Processerne giver anledning til, at den udadrettede vandføring stiger i retning mod overgangen mellem Bornholmer Bassinet og Arkona Bassinet, hvor den antager ca. 48.200 m³/s, dvs. omtrent tre gange så meget som ferskvandstilførslen. På grund af nedadrettet medrivning til den indadrettede tunge bundstrøm gennem Arkona Bassinet aftager denne store udadrettede vandføring i retning mod Kattegat, så der i Bælthavet foregår en middel udstrømning i øvre lag på ca. 33.000 m³/s, mens en indadrettet vandføring i det nedre lag er på ca. 18.000 m³/s. De interne strømninger er dermed væsentlig større end tilførslen af ferskvand på 15.000 m³/s gennem vandløb og floder. Energien til denne forstærkning af strømningerne kommer fra friktionen af vinden mod havoverfladen.

Figuren illustrerer ligeledes, at nettovandføringerne gennem det dybe Gotland Bassin (Betegnet med "Ø") er meget små, hvilket resulterer i den velkendte sårbarhed overfor iltsvind.